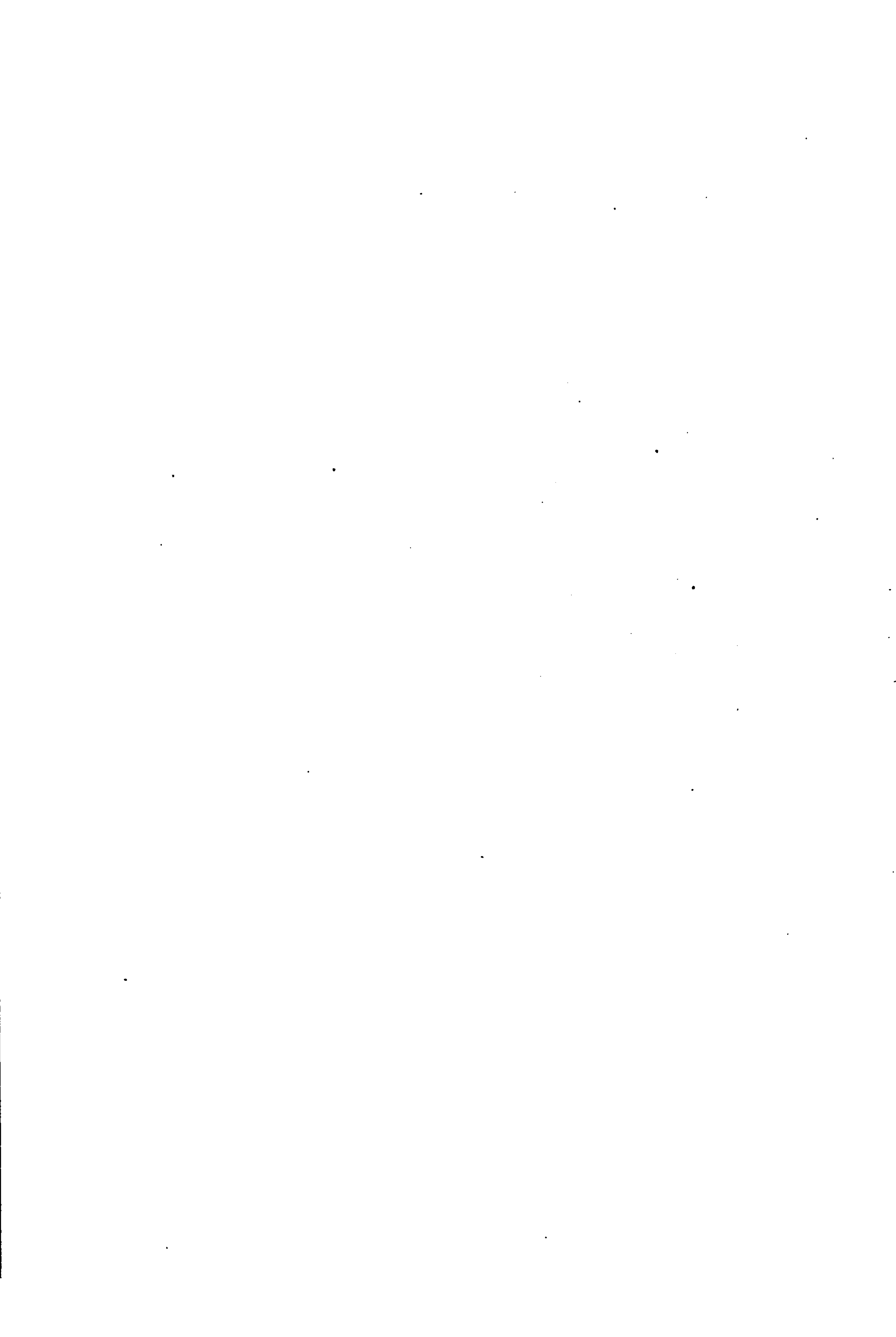



SIGILLVM ACADEMIAE HARVARDIANAE IN NOV ANG
CHRISTO ET ECCLESIAE
VE RI TAS





DER DREHSTROMMOTOR

ALS

EISENBAHNMOTOR

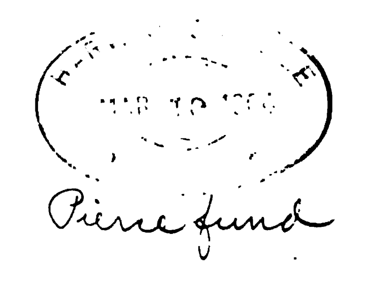
VON

WILHELM KÜBLER,
INGENIEUR,
A. O. PROFESSOR AN DER KÖNIGL. SÄCHS. TECHN. HOCHSCHULE ZU DRESDEN.



MIT ZAHLREICHEN ABBILDUNGEN.

LEIPZIG.
VERLAG VON ARTHUR FELIX.
1903.



108.24
22.42
4

Vorwort.

Es ist ein Jahr her, dass ich im Dresdener Bezirksverein deutscher Ingenieure den folgenden Vortrag hielt; einer an mich ergangenen Aufforderung folgend, entschloss ich mich, denselben zu veröffentlichen, und übergab daher das Manuskript der in Potsdam erscheinenden Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau,[1]) die in Heft 7 u. 8 1902 folgenden Wortlaut veröffentlichte:

Zur Kritik der bisherigen Behandlung der Frage elektrischer Zugförderung auf unseren Eisenbahnen.[2])

Niemand wird leugnen, dass es in der Elektrotechnik eine Eisenbahnfrage gibt, niemand wird die Tragweite entscheidender Entschlüsse in der Behandlung dieser Frage verkennen — aber wenige Elektrotechniker dürften zur Zeit in der Lage oder gewillt sein, zur Vorbereitung solcher Entschlüsse energisch zu helfen. Ich glaube, es gibt für diese Behauptung keinen treffenderen Beweis, als die Durchsicht des Inhaltes namhafter Zeitschriften auf Arbeiten ernster Art, die sich der Sache widmen. Es hat das aber ohne Zweifel eine nachteilige Wirkung, weil schliesslich in der Eisenbahnfrage niemals die Spezialisten die alleinige Entscheidung haben werden, und weil aus diesem Grunde den beteiligten Nichtspezialisten einwandfreies und wirklich instruktives Material zur Beurteilung aller einschlägigen Fragen zugänglich gemacht werden muss, um falsche Vorstellungen und falsche Informationen fern zu halten. In dem Sinne können die Veröffentlichungen über die Schnellbahnversuche auf der Berlin-Zossener Strecke lebhaft begrüsst werden, weil sie sich über den Rahmen einer äusserlichen Beschreibung erheben und den Leser auf wirklich technischen Boden führen. Nur dass die Schnellbahnversuche doch eben nur Versuche sind, die nur langsam in einer wenigstens nicht ganz unmittelbaren Zukunft zum Resultat reifen werden, während das Haupteisenbahnproblem für uns viel näher liegende Aufgaben bietet, deren Lösung mit vorhandenen Mitteln erfolgreich angegriffen werden könnte — wenn eben die Kenntnis dieser Mittel eine allgemeinere, d. h. über die Kreise der Spezialingenieure hinausgehende wäre.

---

[1]) Zeitschr. für Elektrotechnik und Maschinenbau, Potsdam, Bonness & Hachfeld.

[2]) Vortrag, gehalten in Dresden und auf Verlangen wiederholt in Leipzig. Der Verfasser.

Es dürfte nach meinem Gefühl im Augenblick nicht ganz ohne Nutzen sein, einmal kurz die bisherige Behandlung des Problems der elektrischen Zugförderung auf sogenannten Vollbahnen, wie sie bei uns, speziell auch in der Literatur, sich entwickelt hat, zu überblicken; es lässt sich so vielleicht eine Art Einleitung zu erneuten Mitteilungen und Diskussionen gewinnen, die dem Mangel an klarstellendem Material abhelfen werden. Denn wenn auch bei der verhältnismässig geringen Anzahl schon vorliegender Ausführungen es wohl ausschliesslich geschäftliche Interessen engerer Kreise waren, die zu einschlägigen Arbeiten im Laboratorium und Konstruktionsbureau führten, so kann doch kein Zweifel darüber bestehen, dass hierbei bereits Resultate von allgemeinerer Bedeutung gewonnen wurden, deren Mitteilung keineswegs dem oder den Urhebern derselben geschäftlich schädlich, sondern nützlich sein würden; sie würden den Fortgang des Ganzen fördern, ohne den auch die eigenen Absichten der Interessenten sich nicht verwirklichen lassen werden.

Wenn wir von einer Eisenbahnfrage sprechen, so werden wir natürlich nach alter Erfahrung zu deren richtiger Lösung erheblich beitragen, wenn wir von vornherein für klare Formulierung der Fragestellung sorgen. Sehen wir uns also einmal einen Augenblick die Bedingungen an, die die Art des Betriebes diktiert, dem wir die Elektrizität dienstbar machen wollen. Wir sollen Fahrzeuge in Bewegung setzen und erhalten, wir haben also Beschleunigung und Reibung zu decken. Dabei sollen wir möglichst die wirtschaftlich noch zulässige obere Grenze der mittleren Fahrgeschwindigkeit erreichen. Liegt diese hoch, so wird auch die zur Beschleunigung erforderliche Leistung beim Erreichen der Meistgeschwindigkeit eine bedeutende und jedenfalls sehr viel höhere sein, als die, die die freie Fahrt beansprucht. Daher werden Vorortbahnen mit kurzen Stationsentfernungen und grossem Verkehr, bei denen die erhebliche Leistungssteigerung in der Beschleunigungsperiode sich häufig wiederholt, eine grundsätzlich andere Beurteilung erfahren müssen, als sogenannte Fernbahnen. Wir werden die beiden Betriebe etwa so unterscheiden, wie den intermittierenden Betrieb eines Hebezeuges und den permanenten Betrieb einer Transmission; für beide werden wir die Motoren nach verschiedenen Gesichtspunkten bauen und betreiben. Das ist ja eine alte Sache und wird auch beim heutigen Dampfbetrieb bereits in weitgehendem Maſse berücksichtigt. Nun ist es zweifellos bei beiden Betriebsarten wirtschaftlich falsch, nur kurze Zeit mit starker Belastung zu arbeiten, wenn nichts im Wege steht, die Last zu teilen und die Betriebsmittel dafür während des ganzen Tages auszunützen. Bei Fernbahnen versagt da der Dampfbetrieb, der eine Aufteilung in sogenannte „kleine Einheiten“ aus ihm eigentümlichen Gründen nicht zulässt. Bei elektrischem Betrieb gibt es solche Hindernisse nicht; man kann sich den Vorteil der Aufteilung zu nutze machen, wenn man weite, schwach besetzte Strecken einzurichten hat. Daher der oft gehörte Satz: Beim elektrischen Betrieb hat man vor allem auf häufige Fahrten mit kleinen Einheiten zu sehen. Wenn aber die Strecken stark besetzt sind, oder wenn, wie auf den Stadt- und Vorortbahnen, der Verkehr so stark ist, dass man ihn mit kleinen Einheiten nicht mehr bewältigen kann, so verliert dieser Satz sehr an Bedeutung. Es hilft nichts, wenn wir überhaupt elektrische Bahnen bauen wollen, so müssen wir uns auch auf grosse Einheiten einrichten; in der näheren Umgebung der Verkehrszentren sind diese unentbehrlich. Damit entfernt sich unsere Aufgabe ganz von der Ähnlichkeit mit einem Strassenbahnproblem, gegen das ja übrigens auch das Vorhandensein eines eigenen Bahnkörpers einen sehr scharfen Unterschied ergibt.

Wie jeder Vergleich, so hinkt auch dieser, aber in gewissem Sinne zu unserem Vorteil, denn aus seinen zwei Hauptschwächen gewinnen wir auch zwei neue Gesichtspunkte. Vor allem müssen wir als Regel anerkennen, dass ein Kran in Bezug auf seine Motoren u. s. w. ein für allemal mit Rücksicht auf die Maximallast eingerichtet werden muss; beim Eisenbahnbetrieb uns aber niemand zwingt, die jeweilige Zug-

stärke[1]) dem jeweiligen Verkehrsbedürfnis anzupassen. Bedingung ist nur, dass ein solches Verfahren im Betrieb keine besonderen Umstände macht, dass nicht besondere Rangiermaschinen erforderlich werden u. s. w. Damit ergibt sich in vielen Fällen eine Überlegenheit selbstfahrender Einheiten gegenüber dem Lokomotivbetrieb.

In „Berlin und seine Eisenbahnen“ findet sich die Darstellung einer Verkehrszählung, die auf zwei Stationen in der Mitte der Stadtbahn im Jahre 1892 vorgenommen wurde. Das etwas zurückliegende Datum wird hier nicht stören, da es sich nicht um spezielle, sondern grundsätzliche Beurteilung handelt. Ich entnehme der genannten Quelle, dass der Betrieb mit 250 stündlich zu befördernden Personen des Morgens beginnt und auf 8000 gegen Abend gekommen ist. Nehmen wir der Einfachheit halber an, wir hätten Wagen mit je 50 Sitzplätzen, so brauchten wir also während der Hauptverkehrszeit stündlich 160 Wagen, bei 3-Minutenverkehr also Züge von 8 Wagen. Morgens würde ein Zug dieser Stärke stündlich genügen. Ein einziger Zug pro Stunde wäre eine zu seltene Fahrgelegenheit; mehrere Züge von geringerer Wagenzahl zu bilden, wäre ein zweifelhaftes Verfahren, denn man würde einmal die Betriebsbahnhöfe mit ausgedehntem, lästigem und kostspieligem Verschubdienst belasten, zweitens aber die Lokomotiven weit unter der günstigsten Belastung laufen lassen, an Wirkungsgrad also wieder grossenteils einbüssen, was an Traktionsleistung gewonnen würde. Daher lässt man faktisch die Züge den ganzen Tag über in voller Stärke verkehren. Anders beim elektrischen Betrieb. Selbstfahrende Einheiten lassen sich in einfachster Weise dem jeweiligen Bedarf entsprechend zusammenstellen und die direkten Betriebskosten werden deshalb bei Anwendung solcher den Einnahmen aus der zahlenden Last ganz anders folgen.

Zur zweiten Hauptschwäche des Vergleichs: Es steht ohne Zweifel nichts im Wege, in einer Werkstatt zum Antrieb der Hebezeuge Motoren System A, etwa Gleichstrom, vorzusehen, die Transmissionen aber mit Motoren System B, etwa Drehstrom, anzutreiben. Auf „der“ Eisenbahn muss es dagegen den allerschwersten Bedenken begegnen, wenn man Lokalbahnen etwa mit Gleichstrom und Fernbahnen mit Drehstrom

[1]) Die Bedeutung der Anpassung der Zugstärke an die Verkehrsstärke möge an einigen Zahlen über die Schwankungen des Verkehrs auf der Berliner Stadtbahn besprochen werden:

Zeit	Zahl der Fahrgäste:		Zeit	Zahl der Fahrgäste:	
	Börse-Friedrichstrasse	Friedrichstrasse-Börse		Börse-Friedrichstrasse	Friedrichstrasse-Börse
4—5	590	400	3—4	6000	2500
5—6	760	590	4—5	5415	1575
6—7	1250	760	5—6	3500	1570
7—8	1500	895	6—7	1915	2705
8—9	1540	1540	7—8	2500	4465
9—10	1745	1565	8—9	3165	5500
10—11	1540	1250	9—10	2580	6835
11—12	1575	1795	10—11	2000	6830
12—1	2230	1895	11—12	340	675
1—2	3250	2080	12—1	—	675
2—3	5415	2080			

betreiben will; die unabweisliche Folge wäre ja, dass jeder Übergang der Betriebsmittel von einer zur anderen Strecke und jede gemeinsame Befahrung einer Strecke durch beide Bahnen ausgeschlossen würde; in letzter Linie hiesse es also dasselbe, als wollte man die Normalspur aufheben!

Die richtige Fragestellung lautet demnach: „Nach welchem einheitlichen System ist eine Umwandlung der Bahnen für elektrischen Betrieb anzustreben?“ und mit der Einheitlichkeit ergibt sich die Gemeinsamkeit des Interesses an der Diskussion der von den einzelnen ausgehenden Vorschläge, Erfahrungen und Systeme.

Es heisst jetzt also entscheiden, welches System, Gleichstrom oder Drehstrom, das Monopol erhalten soll. Hierbei wird es notwendig sein, von den Betriebseigenschaften auszugehen und die schwierigste Betriebsaufgabe, lange, schwere Einheiten. dichte Zugfolge und kurze Stationsentfernungen, mit anderen Worten Vorortverkehr, als ersten Prüfstein zu benutzen. Erfüllt ein System die Aufgaben dieses, so kann es für Fernverkehr weiter geprüft werden. Häufige Beschleunigung grosser Lasten heisst plötzliche Entwickelung grosser Kräfte mit darauf folgendem, fast gänzlichem kurzem Stillstand des Stromverbrauches. Wieder liegt es nahe, auf die Hebezeuge zurückzugehen und bei der technischen Behandlung des Problems genau wie dort an ausgleichende Akkumulatoren — Pufferbatterien — zu denken. Diesen Weg ist man bekanntlich in dem Vorschlage der Union E. G. in Berlin für die Umwandlung des Stadt- und Ringbahnbetriebs für elektrische Zugförderung gegangen, und wer die Diskussion dieses Projektes objektiv und aufmerksam verfolgt hat, wird sich der Überzeugung nicht haben verschliessen können, dass es für die spezielle Aufgabe im Augenblick Erfolg versprechend erschien. Der praktische Versuch mit einem ähnlichen System auf der Wannseebahn hat aber, wenn auch sonst seine Resultate keineswegs verallgemeinert werden können, gezeigt, dass die Leitungswiderstände bei der verhältnismässig niedrigen Spannung trotz der sehr grossen Querschnitte die Wirtschaftlichkeit in unzulässiger Weise beeinflussen können, wenn nicht auf ausserordentlich viele Akkumulatorenbatterien gerechnet werden soll, deren Anschaffungs- und Unterhaltungskosten doch zu Bedenken Veranlassung geben dürften.

Ich möchte später auf das System an der Hand dieses Beispieles zurückkommen, nehme aber hier vorweg, dass, da dies System Gleichstrom voraussetzt, es unter dem Zwange einer Beschränkung der Spannung steht. Das ist hier wichtig. Vom Generator zum Fahrzeug braucht man eine Leitung, die Verluste verursacht; das Gesetz, nach dem die Verluste zu berechnen sind, sagt in seiner einfachen Form:

$$\text{Verlust} = \text{Strom}^2 \,.\, \text{Widerstand}$$

und Widerstand

$$= \frac{\text{Länge} \times \text{Materialkonstante}}{\text{Querschnitt}}$$

Es ist ohne weiteres klar, dass man bestrebt sein muss, um wirtschaftlich zu arbeiten, d. h. Kosten an Leitungsmaterial und an verlorener Energie zu sparen, bei möglichst niedriger Stromstärke zu übertragen. Nachdem aber die Leistung dem Produkte aus Stromstärke und Spannung proportional ist, hat man daher möglichst hohe Spannungen anzustreben — ein längst bekannter Satz. Die obere Grenze für die Spannung liegt für Eisenbahnbetrieb bei Gleichstrom schon bei 750—1000 Volt, und damit kommt man bei den schweren Zügen der Vollbahnen noch zu ganz ausserordentlich hohen Stromstärken.[1]) So entsteht eine gewisse Verlegenheit beim Gleichstrom, aus der man sich gewöhnt hat, nach dem amerikanischen Dogma Rettung zu suchen: Man leitet von der Zentrale aus den sehr hohe Spannungen, 20000 Volt und mehr, gestattenden Drehstrom in längs der Bahn verteilte Unterstationen und formt hier um;

[1]) $>$ 1200 Amp.

die Unterstationen legt man in so geringen Entfernungen an, dass der starke Gleichstrom in der bleibenden kurzen Strecke bis zum Zuge nicht mehr allzuviel Verluste verursacht. Freilich muss dann der starke Strom durch die Schleifkontakte geleitet werden, was nicht gerade angenehm ist, auch kann die Stromzuführung mit Rücksicht auf die grossen Querschnitte der Arbeitsleitung nur dicht über dem Bahnterrain, nicht aber als Oberleitung ausgeführt werden, was namentlich bei Weichen und Wegüberführungen im Niveau unangenehm ist, doch ist man ja, wie praktische Ausführungen zeigen, dieser Schwierigkeiten Herr geworden. Die amerikanische Anordnung hat für die Fabriken die Annehmlichkeit, dass sie eine ganze Reihe Fabrikate konsumiert und auch dem seines theoretischen Interesses wegen gern etwas überschätzten rotierenden Umformer ein weites Anwendungsgebiet verspricht. Dem Betriebe verursacht sie aber neben den bedeutenden Anlagekosten, die verzinst sein wollen, die Unannehmlichkeit der Steigerung des Bedarfs an Beamten. Was das heisst, mögen Zahlen zeigen:

Nach dem Etat für 1900 ist die Betriebslänge der preussischen Staatsbahnen mehr als 30000 km; rechnet man auf 30 km eine Unterstation, was sehr wenig wäre, so erhält man bei nur einfacher Besetzung und doppelter Schicht ohne Reserven 2000 Beamte, bei 1000 Mk. Lohn also 2000000 Mk. jährliche Wartungskosten. Dies nur für die preussischen Staatsbahnen! Damit ist das System für Anwendung im grossen wohl erledigt. —

Dem sehr nahe liegenden Weg, die Unterstationen ganz fortzulassen, nicht umzuformen, sondern auf den Fahrzeugen Drehstrominduktionsmotoren anzuwenden, hat man, abgesehen von Versuchen von Siemens & Halske, in Deutschland bis zum Beginn der Schnellbahnversuche beinahe gar keine Beachtung geschenkt. Ein nicht geringer Grund dafür lag darin, dass der Drehstrommotor in beteiligten Kreisen nicht verstanden wurde oder — verstanden werden sollte. In den Hauptwerken und namentlich in den amerikanischen Firmen war man im Gleichstrom schon so weit entwickelt, dass der Drehstrom nur als unangenehmer Konkurrent erscheinen musste; in allem, was prompte Lieferung von Reserveteilen u. s. w. betraf, hätte ja sicher eine Umänderung der Bahnpraxis weitgehende Folgen, die man zum mindesten hinausschieben wollte, und daher das erwähnte Dogma, zu dessen Stützung unermüdlich Prospekte herausgegeben werden; und speziell amerikanischerseits wird dabei noch eine Lehre entwickelt, die lautet: der Drehstrommotor zieht weniger ökonomisch an, als der Gleichstrommotor. Das ist nun bis zum gewissen Grade richtig und es muss deshalb bei Bahnprojekten erwartet werden, dass nach dieser Richtung hin sorgfältige Überlegungen stattfinden.

Um hier eigenes Versuchsmaterial zu gewinnen, ist wohl auch der Versuchsbetrieb auf der Wannseebahn aufgenommen worden. Ich halte mich nicht für berechtigt, in eine Besprechung des dem Probebetrieb zu Grunde liegenden Projektes einzutreten, da die mit dessen Ausarbeitung verbundenen Vorgänge nicht bekannt sind, aber doch wohl angenommen werden muss, dass dabei, wie bei allen Bauvorarbeiten, auch eine Reihe von Nebenumständen die sachlichen Erwägungen beeinflusst haben werden. Nachdem aber die Resultate veröffentlicht sind,[1]) hat die technische Wissenschaft nicht nur das Recht, sondern die Pflicht, sich mit diesen zu beschäftigen. Es handelt sich zwar nicht um einen Versuch, der im technisch-wissenschaftlichen Sinne als bahnbrechend anzusehen wäre, da nur wiederholt worden ist, was Werner Siemens im Jahre 1879 auf der Berliner Gewerbeausstellung zeigte, nämlich, dass Fahrzeuge durch Elektromotoren in Bewegung gesetzt werden können, höchstens mit dem Unterschiede, dass man das Zuggewicht hier grösser gewählt hat, was anderwärts allerdings auch schon geschehen war; aber als Bestätigung der inzwischen entwickelten Methoden für die Bearbeitung von Bahnprojekten ist er doch sehr wertvoll und beweist, wie die preussische

[1]) Glasers Annalen. 1900. Organ für die Fortschr. des Eisenbahnwesens. Dgl·

Eisenbahnverwaltung festgestellt hat, dass bei dem gewählten System eine grössere Wirtschaftlichkeit als beim Dampfbetrieb nicht zu erzielen ist.[1])

Die Anordnung des Probebetriebs ist kurz folgende (vergl. Z. V. D. I. 1900): Ein Zug — ein einziger — von 220 t Gewicht im normal besetzten Zustande wird von zwei Motorwagen, einem an jedem Ende, bewegt. Bei der Anfahrt wirken beide Wagen treibend, während der freien Fahrt nur einer. Der Strom wird aus einem Werk bezogen, das über eine bei km 7,2 einmündende Leitung an die Strecke angeschlossen ist. Am Anfange und am Ende befinden sich an der Strecke zwei grosse Akkumulatorenbatterien, die von der A.-G. in Hagen i. W. zur Verfügung gestellt worden sind und, nebenbei bemerkt, jede mehr als 60000 Mk. kosten würden. Die über den Betrieb bekannt gewordenen Zahlen entnehme ich einer Veröffentlichung des Herrn Eisenbahndirektor Bork in Glasers Annalen, der die Anlage gebaut hat und leitet.

Zunächst ergibt sich, dass die Batterie an einem Ende, wenn ein Zug abfährt, bis zu ihrer vollen Leistungsfähigkeit beansprucht wird, ein zweiter Zug gleichzeitig also nicht gespeist werden kann. Die Batterie belastet somit das Anschaffungskonto für das rollende Material erheblich; zudem nimmt sie einen Raum von 280 qm Grundfläche in Anspruch.

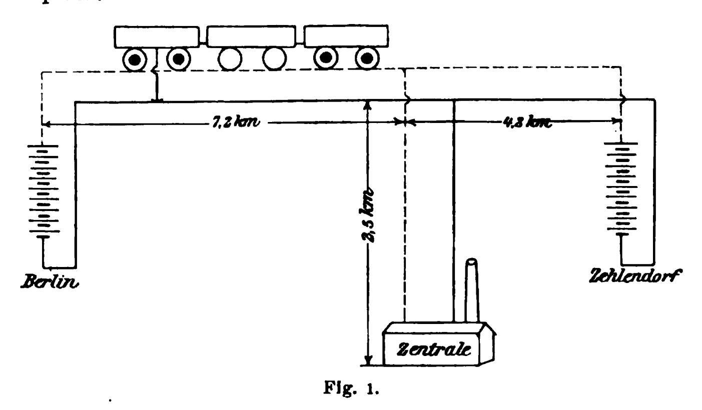


Fig. 1.

Als zweites finde ich folgende Zahlen der Verluste, die durch die Strombewegung vom Krafthaus bis zum Zuge während einer Fahrt verursacht werden:

Leitungsverlust	7.5 Kw-Std.
Batterieverlust	21,6 „
Zusammen	29,1 „
Verbrauch am Zuge	52 „
Prozentualer Verlust also	56 %.

Durch diese Tabelle wird es verständlich, „warum", wie in der E. T. Z. mitgeteilt wird, schon allein die Kosten des Stromes grösser sind, als der Verbrauch an Kohlen einer normalen Lokomotive. —

Ich verlasse jetzt die heimische Praxis und folge — einem schon vor mehreren Jahren von mir gemachten Vorschlage entsprechend[2]) — der Praxis von Brown, Bovéri & Co., indem ich eine zweite Tabelle über die Verluste bei Drehstrom heranziehe:

Leitungsverlust	0,3 Kw-Std.
Transformatorenverlust	2,6 „
Zusammen	2,9 „

[1]) E. T. Z. 1901, S. 333.

[2]) Vgl. Kübler-Schimpff, Elektrischer Betrieb der Wannseebahn. Verl. von Simion, Berlin. 1897.

Und es ergibt sich das bemerkenswerte Resultat, dass die Verluste nur noch $^1/_{10}$ der früheren sind und ca. 5 % betragen. Nun sagte ich bereits, dass man dies zwar zugäbe, aber dagegen einwendete, dass der Drehstrommotor unrationeller arbeite, als der Gleichstrommotor. Diese Frage kann ohne einen umfangreichen Apparat an Zahlen und Rechnungen nicht zur Entscheidung gebracht werden. Ich benutze daher ein Versuchsergebnis, das einer Arbeit von Professor C. Wilson entnommen ist; dieser fand beim Vergleich der Drehstrombahn Burgdorf-Thun und der Gleichstrombahn in Chicago einen um 13 % schlechteren Wirkungsgrad beim Anfahren mit Drehstrom[1]; vorbehaltlich geeigneter Verbesserungen würden wir beim Drehstrom, also gegen den Wannseebahnversuch, zunächst vielleicht etwa nur 35 % Gewinn von den 56 % behalten; diesen Betrag dürfen wir aber unter den sicheren Forderungen verbuchen.

Nach den Messungen des Herrn Eisenbahndirektor Bork ist der Aufwand an elektrischer Energie in der Kraftstation während einer Fahrt von 12 km bei seinem System 80 Kw-Std., bei Drehstrom also rund 60 Kw-Std. Die Kw-Std. kann ein grosses Elektrizitätswerk ohne Schwierigkeit für 5 Pf. liefern, wenn von indirekten Unkosten zunächst abgesehen wird; eine Fahrt kostet an Strom also 3 Mk. Den Verbrauch am Motorwagen selbst gibt die gleiche Quelle zu 52 Kw an, d. i. in PS-Std. 71,5; der Dampfzug ist 13 % schwerer als der elektrische Zug, der Verbrauch für ihn also, abgesehen von dem höheren Eigenwiderstand der Lokomotive, 81 PS-Std. Nach Angaben, die ich der Diskussion des Stadtbahnprojektes der U. E. G. entnehme, hält die preussische Staatsbahnverwaltung eine Ideal-Lokomotive für realisierbar, die pro PS-Std. im Vorortverkehr 2 kg Kohle beansprucht, d. i. 160 kg im vorliegenden Falle. Der Preis einer Tonne für Lokomotivheizung unter den gegebenen Bedingungen geeigneter Kohle wird zu 18 Mk. angegeben, also betragen die Kohlenkosten $0{,}16 \times 18$, d. i. 2,87 Mk.; würde an Stelle der Ideallokomotive der Durchschnitt der Berliner Stadtbahn mit 14,2 kg pro Zugkilometer gesetzt, so bekämen wir 170 kg und 3,06 Mk. Die Kosten an Rohmaterial dürften also bei einem Vergleich auf gerechter Basis schon so ziemlich gleich sein. Von Schmierung, Putzzeug und Verschubbewegungen, Leerfahrten u. a. m. war noch keine Rede.

Angesichts dieser Zahlen erscheint die Erklärung, dass der elektrische Betrieb auf alle Fälle teurer werden müsse,[2] unhaltbar. Trotzdem wird von gegnerischer Seite die Abwehr der neuen Betriebsmittel aufs heftigste betrieben; ein Blick in Glasers Annalen, Jahrgang 1900, lehrt, dass man grundsätzlich keinen Vorteil der neuartigen Anordnungen anerkennen will, und es wird daher die gewonnene Bresche noch nicht ausreichen; zum Glück ist aber auch die Munition noch längst nicht verschossen.

Zur Kritik des Probezuges könnte zunächst eine Nebensache berührt werden. Der Wannseebahnzug ist mit Motoren ausgerüstet, die die Achsen unmittelbar, d. h. ohne Rädervorgelege, antreiben. Dadurch ist ein sehr hohes Motorgewicht bedingt, an Wirkungsgrad aber nichts gewonnen, weil der langsam laufende Motor zum direkten Antrieb der Achsen nicht so rationell gebaut werden kann, wie ein schneller laufender Motor. Die Motoren wiegen 3 t pro Stück, das macht bei sechs Motoren 18 t. Bei Zahnrädervorgelegen würde man mit 2 t pro Motor auskommen, bei Drehstrom aber mit noch geringerem Gewicht. Die Motoren des Schnellbahnwagens, den die A. E. G. gebaut hat, wiegen bei einer maximalen Leistung von 3000 PS 12800 kg; auf der Wannseebahn haben wir maximal 1000 PS und werden diese mit 6000 kg Motorgewicht herausbringen können. In welcher Weise dann das gesamte Zuggewicht sich verringern würde, ist durch Schätzung nicht anzugeben; man müsste geradezu einen Wagen durchkonstruieren und das ginge doch über den Rahmen dieses Vortrages hinaus;

[1] Transactions of the Inst. of electr. Engineers. Vol. XXX, S. 191.

[2] Das wurde in den Tagesblättern im vorigen Herbst mehrfach gesagt.

auch würde der Vergleich nicht mehr einwandsfrei bleiben, weil man unwillkürlich so konstruieren würde, dass dem Wagen Vorzüge zu teil würden, von denen man sagen kann, dass sie bei Dampfbetrieb auch erzielbar wären. Denn das Gewicht pro Sitzplatz beträgt auf der Wannseebahn, ohne dass besonderer Luxus in der Ausstattung der Wagen entwickelt ist, 0,530 t, und es kann keine Frage sein, dass man diese Zahl erheblich herunterbringen kann.

Von dieser Abschweifung kehre ich zum Vergleich zwischen Dampf und Elektrizität zurück. Der Nachweis, dass der Rohstoffverbrauch im elektrischen Betriebe keineswegs grösser zu sein braucht, als im Dampfbetrieb, war bereits erbracht. Ich müsste nun eigentlich in der Richtung weiter gehen, dass ich den Vergleich zwischen Drehstrom und Gleichstrom über die Annahme eines einzigen Versuchszuges hinaus weiter durchrechnete; das Resultat würde sein, dass die Überlegenheit des Drehstromes noch schärfer herauskommen würde. Ich muss aber befürchten, dass ich zu sehr ins elektrotechnische Spezialgebiet hineinkommen würde, und deshalb diese Ausführungen wohl besser bei anderer Gelegenheit bringen. Wichtiger und von grösserem Interesse wird es sein — etwa unter stillschweigender Voraussetzung, dass Drehstrom angenommen werden soll, — in die Zukunft zu blicken und die Frage einer Umwandlung der Eisenbahnen unter dem Gesichtspunkt einer erhöhten Leistungsfähigkeit zu betrachten. Die Frage, ob eine Bahn bei der heutigen Leistungsfähigkeit mit gleichen oder wenig geringeren Betriebskosten elektrisch betrieben werden kann, wird kaum andere als akademische Bedeutung gewinnen können, weil es, nachdem der Dampfbetrieb einmal da ist, ein Unsinn wäre, die Umwandlung vorzunehmen, ohne Betriebsverbesserungen zu erreichen, wenn die Ersparnis nicht mindestens so gross ausfiele, dass die Verzinsung des alten Kapitals und des neu aufzuwendenden Kapitals eine bessere würde als bisher, und das Ziel wird selbst ein grosser Optimist nicht zu erreichen hoffen. Sobald dagegen eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit so wie so vorgenommen werden muss, stellt sich die Sache ganz anders. Da kommt zunächst die Frage der erhöhten Fahrgeschwindigkeit — man braucht ja nicht gleich an 200 km zu denken — und bei grösserer Fahrgeschwindigkeit treten ganz neue Gesichtspunkte auf. Die notwendigen stärkeren Beschleunigungen würden beim Dampfbetrieb eine Verstärkung der Lokomotiven und des Lokomotivgewichts erfordern, also doppelt ungünstig wirken, während beim elektrischen Betrieb das Zuggewicht nicht wesentlich steigen würde. Die Bremsperiode würde ferner in ihrer Bedeutung vortreten; um das recht zu illustrieren, habe ich für den mehrfach besprochenen Wannseebahnzug eine kleine Tabelle aufstellen lassen.

Bremsverluste beim Halten eines Wannseebahnzuges von 220 t Gewicht und verschiedenen Geschwindigkeiten:

V km/Std.	V m/Sek.	V^2	m V^2 in mkg	PS bei 20 Sek. Brsg.
40	11,1	124	1 390 000	930
50	13,9	194	2 180 000	1450
60	16,7	278	3 130 000	2040
70	19,4	375	4 200 000	2800
80	22,2	490	5 550 000	3660
90	25	625	7 000 000	4660
100	27,8	770	8 630 000	5750

Ich greife einmal die Zahlen für die 60 km heraus und finde eine beim Bremsen zu vernichtende Leistung von 2040 . 20 PS-Sek. 2040 PS repräsentieren eine ganz tüchtige Dreherei. In PS-Std. ergeben sich 11,3. Der Zug hält während der Fahrt von 12 km 5 mal, das macht also 56,5 PS-Std. Oben war der Gesamtaufwand für eine Fahrt zu 80 PS-Std. gefunden, bei dem grösseren Gewicht erhöhen wir entsprechend auf 120; danach betragen also die Bremsverluste rund die Hälfte. Gelänge

es, von diesem Betrage auch nur ein Drittel wieder zu gewinnen, so würde der Aufwand für eine Fahrt von 120 PS-Std. auf 80 PS-Std., d. i. unter Einrechnung von 7 % Leitungsverlusten, auf 63 Kw-Std. heruntergehen; für Stromkosten hätten wir also 3,15 Mk. zu rechnen, auf Kohlen beim Dampfbetrieb aber $3 \cdot \frac{120}{80} = 4{,}50$. Damit wäre der Sieg der Elektrizität gesichert.

Diese Erwägung hat bereits zu mancherlei Vorschlägen geführt, von denen der bekannteste dahin geht, dass die Anfangsbeschleunigung so hoch als möglich gehalten werden soll, während man dann von der Meistgeschwindigkeit aus den Zug auslaufen lassen soll. Folgende Tabelle erläutert das näher:

Zeit	Geschwindigkeit in km/Std.	
Sekunden	Elektrizität	Dampf
0	0	0
30	45,6	15
45	50	21
60	48	26,3
75	45,5	31
90	42,8	35
122	37,5[1]	41
141	0	43,5
150	—	44,4[1])
—	—	5

Der Lösung haftet aber der Nachteil an, dass die anfänglich verstärkte Leistung grössere Kräfte beansprucht, verhältnismässig schwere Motoren erforderlich macht und das Krafthaus belastet — daher zu hohes Anlagekapital. Aus dem Grunde habe ich vor längerer Zeit ein anderes System, das diese Nachteile nicht zu haben scheint, vorgeschlagen, und zwar unter Benutzung der besonderen Eigentümlichkeit der Drehstrommotoren bei Übersynchronismus unter Energieabgabe ans Netz als Bremse zu wirken.[2]

Sie sehen, an allen möglichen Stellen zeigen sich Vorzüge des Drehstromes — die Frage der elektrischen Fernbahnen löst sich damit von selbst zu Gunsten desselben — und da von Gegnern des elektrischen Betriebes diesem bisher bei uns überhaupt kaum Beachtung geschenkt wurde, so können wir im Bewusstsein, über ansehnliche Reserven zu verfügen, guten Mutes sein. Vorerst möchte ich jedoch noch ganz kurz einige allgemeinere Punkte aus der Diskussion des elektrischen Eisenbahnproblems berühren. Zu Gunsten des Dampfbetriebes wird meist geltend gemacht, dass er eine Unabhängigkeit der Züge gewährleiste, während im Falle der elektrischen Zugförderung die Betriebssicherheit durch eine Störung in der Zentrale auf der ganzen Linie gefährdet sei. Dies Bedenken komme einmal vom Standpunkt des Verkehrs, dann aber auch von dem der Landesverteidigung aus in Frage. Was nun den ersteren anbelangt, so ist leicht festzustellen, dass die Befürchtung durch zweckmässige Anordnung gegenstandslos gemacht werden kann. Ist es wohl schon jemand eingefallen, die öffentliche Beleuchtung, deren Betriebssicherheit oft von grösster Bedeutung ist, aus dem Grunde mit Petroleumlampen durchzuführen, weil diese nicht von einer Zentrale abhängig sind? — Das zweite Bedenken erscheint mir auch nicht schlimm. Niemand wird mich hindern können, auf den Geleisen der elektrischen Bahnen mit anderen Betriebsmitteln zu fahren, als mit den elektrischen, wenn wirklich eine Speisung der Fahrdrähte nicht mehr möglich ist und — wenn die Schienen noch nicht zerstört worden sind. Man muss sich nur auf die Sache rechtzeitig einrichten. Man kann ja die Zentralen — freilich wieder nur beim Drehstrom — 100 km von der Grenze zurücklegen und hat dann noch den

[1]) Beginn der Bremsung.

[2]) S. w. Kübler-Schimpff. Elektr. Betrieb der Wannseebahn.

Vorteil, bei einer etwaigen feindlichen Invasion nach Belieben Strecken auszuschalten. Leitungen zeitweilig kurz zu schliessen u. s. w., was sehr schnell geht und lange nicht so umständlich ist wie Sprengungen u. s. w.; es wäre wohl Spielerei, das weiter auszuspinnen.

Die Unabhängigkeit der Züge von der äusseren Kraftzufuhr enthält dagegen ein hohes Mafs von Betriebsunsicherheit, wie zahlreiche Unfälle dauernd beweisen. Die durch die Abhängigkeit möglich werdende Verbesserung der Signale durch Hinzufügung einer Regelung der Streckenspeisung u. s. w. wird da eine wesentliche Verbesserung bringen.

Von Rauchbelästigung, Beleuchtung u. s. w. will ich hier als Nebensachen nicht sprechen. Denn es bleibt noch eine grössere Frage und das ist das Anlagekapital für die elektrische Einrichtung. Es ist unleugbar, dass dies gross ist und mehr anfängliche Ausgaben verlangt, als eine einmalige Beschaffung leistungsfähigerer Lokomotiven. Um Zahlen zu nennen, greife ich auf das Projekt für die Berliner Stadt- und Ringbahn zurück. Dort werden, abgesehen von den Motorwagen, 25 Millionen veranschlagt bei einer Verkehrsleistung von rund 1200 stündlichen Zugkilometern. Der Betrag ist sehr bedeutend, lässt sich aber und zwar wieder durch Anwendung von Drehstrom wesentlich reduzieren. Zunächst fallen die Akkumulatorenunterstationen heraus, wodurch 6 Millionen gewonnen werden, dann aber — was freilich, wenn auch nur bis zu einem gewissen Grade und unter besonderen Bedingungen, auch bei Gleichstrom zu machen wäre — lässt sich eine weitere bedeutende Kapitalreduktion gegen jenen Anschlag durch Anwendung von Dampfturbinen an Stelle von Kolbenmaschinen erzielen. Die Ersparnis wird mit 30 % der Kosten der Zentrale nicht überschätzt. Für das Berliner Projekt gäbe das einen weiteren Gewinn von etwa 1,5 Millionen.

Und mit den Dampfturbinen und mit der Beseitigung der Unterstationen gewinnen wir weiter gegenüber jenem Projekt auch ausserdem bedeutend an Betriebsausgaben, wie die letzte Tabelle zeigt.

Unionprojekt.

1.	3 Ingenieure je 10000 Mk.	30000 Mk.
	2 Maschinenmeister	6000 „
	16 Maschinisten	35000 „
	8 Hilfsmaschinisten	12000 „
	30 Heizer je 1500 Mk.	45000 „
	6 Monteure je 1800 Mk.	10800 „
	16 Arbeiter je 1000 Mk.	16000 „
2.	98000 t Kohlen	882000 „
3.	Abladen und Stapeln	39200 „
4.	Schmier- und Putzmaterial	60000 „
5.	Unterhaltung der Leitungen 2,5 %	172500 „
6.	Unterhaltung der Gebäude 1,5 %	60000 „
7.	Unterhaltung der Maschinen 5 %	355000 „
8.	Unterhaltung der Akkumulatoren 6 %	360000 „
		2083500 Mk.

Dampfturbinenanlage.

1.	1 Ingenieur	10000 Mk.
	4 Maschinenmeister	12000 „
	8 Maschinisten	17600 „
	8 Schmierer[1])	8000 „
	zu übertragen	47600 Mk.

[1]) Diese würde ich gegenwärtig für entbehrlich halten.

	Übertrag:	47600 Mk.
16 Kesselwärter	19200	„
6 Monteure	10800	„
6 Arbeiter	6000	„
2. 98000 t Kohle	882000	„
3. Abladen und Stapeln	39200	„
4. Schmier- und Putzmaterial	20000	„
5. Unterhaltung der Leitungen 2,5 $^0/_0$	172500	„
6. Unterhaltung der Gebäude 1,5 $^0/_0$	15000	„
7. Unterhaltung der Maschinen 5 $^0/_0$	175000	„
	1387300	Mk.

M. H.! Ich habe Ihre Zeit schon zu lange in Anspruch genommen. Lassen Sie mich ein Ende machen. Ich kann nicht sagen, ich bin fertig mit dem, was ich zur Sache sagen könnte, aber ich glaube nicht, dass ich noch viel beizubringen brauche, um die wirtschaftliche Möglichkeit elektrischer Zugförderung als gesichert erscheinen und deren Vorzüge nach allen Richtungen hin erkennen zu lassen, ich bin auch überzeugt, dass Sie diese nicht mehr in Abrede stellen. Freilich macht man stets seine Erfahrungen und ich halte es nicht für ausgeschlossen, dass der eine oder andere von Ihnen mich auf Schwierigkeiten hinweisen könnte, die ich übersehen habe. Um solche Hinweise bitte ich geradezu, denn die Elektrotechnik bedarf derselben als Anregung, um durch weiteren Ausbau ihrer Mittel schliesslich auch den letzten Einwand beseitigen zu können. Dass sie in der Lage ist, sich die Aufgabe in dieser Form ohne Phantasterei zu stellen, geht aus dem hervor, was bis jetzt erreicht ist. — Überlegt man es recht, so ist es schwer, einzusehen, warum man sich an einzelnen Stellen in Eisenbahnkreisen geradezu mit Leidenschaft den Vorschlägen der Elektrotechnik widersetzt, wie es z. B. in der Diskussion des U. E. G.-Projektes zu Tage getreten ist, dass man an Fragen wie die der doppelten Besetzung des Führerstandes hängen bleibt, über die Amerika längst hinaus ist, und dass man die Diskussion ängstlich auf das vorliegende Aktenstück beschränkt, anstatt die Aufgabe in grossem Stile anzugreifen. Wie einst im Trambahnwesen fängt gegenwärtig im Vollbahnwesen das Ausland an, uns vorzueilen. Wenn man die Diskussionen der englischen Institution of electrical Engineers liest, so klingen diese ganz anders als die erwähnten Berliner Verhandlungen. Zu beachten ist es auch, dass bei dem jüngsten Wettstreit in London die ungarische Firma Ganz & Co. mit ihrem Drehstromprojekt weitaus das beste Angebot gemacht hat, trotzdem dortige Häuser teils amerikanischen, teils deutschen Rückhalt hatten, und dass das Projekt sicher zur Ausführung gekommen wäre, wenn nicht ein Konkurrent durch Ankauf der betreffenden Bahn, wie man sagt, dem Sieger einen Knüppel zwischen die Beine geworfen hätte — ein bedauerliches Verfahren. Für uns geht aber aus der Londoner Erfahrung hervor, dass es bedenklich ist, auf den Lorbeeren der Pariser Ausstellung ruhen zu wollen, dass es bedenklich ist, gegen gute Vorschläge mit anderen Mitteln als mit besseren Vorschlägen zu kämpfen, die deutsche Technik würde das sonst eines Tages bitter zu bereuen haben. Jedenfalls wird eine gewisse Initative zu erstreben sein, um bei gegebenen Voraussetzungen rechtzeitig richtige grundsätzliche Entscheidungen herbeizuführen, die für die Zukunft massgebend sein werden. „Denn nur beim ersten sind wir frei, beim zweiten aber Knechte!“

Am 25. April 1902 sprach der damalige Chefelektriker der Union El. Ges. in Berlin Herr Dr. Niethammer im elektrotechnischen Verein in Berlin „Über den Entwurf sehr rasch und sehr langsam laufender Maschinen“ und fügte in seinen Vortrag folgenden Passus ein:[1])

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift 1902, S. 439.

„Bei entsprechenden Ventilationsverhältnissen, die auch bei direkt künstlicher Kühlung den Wirkungsgrad und Preis grösserer Typen nicht nennenswert ändern, ist also in der Erwärmung keine Begrenzung der Ausführbarkeit zu finden, solange nicht eine bestimmte Raumbeschränkung vorliegt, wie dies bei Strassen- und Vollbahnen der Fall ist. Die Erfahrung lehrt, dass wir betriebsfähige Schmalspurlokomotiven mit Gleichstrommotoren von 15 PS bei 300 mm Spur, bei 700 mm Spur noch für 90 PS bauen können; ferner wissen wir, dass es Gleichstrommotoren von 10—60 PS für eine Spurweite von 900—1000 mm gibt, die alle Anforderungen der Strassenbahnen erfüllen, die also namentlich bei dem oftmaligen Anfahren und bei Steigungen die Gesamtverluste auszustrahlen vermögen.[1]) Vergleichende Berechnungen ergeben ferner, dass es nicht schwierig ist, Drehstrommotoren[2]) mit genügender Ausstrahlfläche für Vollbahnzwecke mit normaler Spur zu bauen, wobei ein Anfahren und Anhalten nur in längeren Perioden erfolgt. Eingehende Untersuchungen ergeben aber, dass der Drehstrommotor infolge Raummangels und demzufolge ganz unzulässiger Erwärmung für schwierige Strassenbahn-, Hochbahn- und Vorortbetriebe, wo der ganze Betrieb fast nur im Anfahren und Auslaufen besteht, vollständig versagt. Schon bei Gleichstrommotoren von 100—300 PS für Hochbahnzwecke hat man in den Vereinigten Staaten des Raummangels wegen dazu greifen müssen, sämtliche Isolationsmaterialien für die Wicklungen aus Glimmer herzustellen, um Übertemperaturen bis 150° zulassen zu können, was sich offenbar sehr gut bewährt hat. Aber bei Drehstrom liegen die Verhältnisse viel ungünstiger, wie ein Beispiel zeigen soll. Betrachten Sie einen 200 PS-Motor einmal für Gleichstrom und dann für Drehstrom während der Anfahrperiode, so ergibt sich ein ganz gewaltiger Unterschied. Die elektrischen Wirkungsgrade beider Motoren seien bei 200 PS ca. 94 %, die Verluste seien

	Gleichstrom 200 PS	3f. Moment	Drehstrom 200 PS	3f. Moment
	Lauf PS	Anfahren PS	Lauf PS	Anlauf PS
Ankerkupfer (Rotor)	3½	22	3½	43
Erregerkupfer (Stator)	3½	22	3½	43
Eisenverlust	5	0	5	12[3])
Summe	12	44	12	98

Nun ist es Tatsache, dass man bei Gleichstrombahnmotoren diese 44 PS bei öfterem Anfahren kaum los wird, wieviel weniger die 98 PS bei Drehstrom,[4]) ganz abgesehen von der Unwirtschaftlichkeit. Es ist da zum mindesten eine ganz energische künstliche Kühlung erforderlich, die bis jetzt praktisch jedenfalls noch nicht erprobt ist; es wird dieses Beispiel schlagend die Berechtigung der vielen amerikanischen Hoch- und

[1]) Es handelt sich bei Strassenbahnmotoren in der Regel um ca. 30—50 Watt pro qdm Aussenfläche bei + 75° Übertemperatur pro Stunde.

[2]) Von ca. 200—300 PS Normalleistung (600—900 PS Maximalleistung) und 500 bis 1000 Touren.

[3]) 7 PS im Rotor, auch bei geringen Geschwindigkeiten sind die Eisenverluste beim Drehstrommotor wesentlich grösser als beim Serienmotor.

[4]) Beim Anfahren in verketteter Schaltung (Anker in Serie) sind die Verhältnisse nicht viel besser. E. J. Berg berechnete im Street Railway Journal 1901, dass bei günstigsten Verhältnissen bei einer Stadtbahn das Drehstromsystem 26 % mehr Effekt und 2,2 mal soviel Volt-Ampère verzehrt, wie das Gleichstromsystem.

Stadtbahnen mit 25periodiger Drehstromübertragung, rotierenden Umformern und Gleichstrommotoren ergeben. Die amerikanischen Ingenieure haben dieses System nach gründlicher Untersuchung gewählt[1]) und keinesfalls in der Absicht, mehr Maschinen und Apparate in Bestellung zu bekommen, bezw. weil ihnen das Drehstromsystem zu schwierig schien. Bevor man so absprechend wie Prof. Kübler über das Drehstrom-Gleichstromsystem urteilt, sollte man mindestens die amerikanische Literatur etwas genauer studieren, wo die Begründung für das besagte System in sehr sachlicher Weise gegeben wird; auch in der Diskussion über die Projekte für den inner circle in London Ende letzten Jahres ist sehr interessanter Stoff zu dieser Sache zu finden.

Dass die amerikanischen Ingenieure für Fernbahnen auch dem Drehstromsystem die Zukunft zuschreiben, wird bis jetzt niemand widersprochen finden. Überdies hat die General Electric Co. vielleicht praktisch und theoretisch mehr in Drehstrombahnen gearbeitet, als man denkt; selbst in Europa kann jedermann eine von der General Electric Co. ausgeführte Drehstrombahn im Betrieb sehen, nämlich die Linie Varese-Milano in Oberitalien. Ob die genannte Firma dieses System für die Vorortlinie vorgeschlagen hat, will ich hier unerörtert lassen, jedenfalls haben die Betriebsergebnisse nur die Zweckmässigkeit des Drehstrom-Gleichstromsystems erwiesen. Ob sich wirklich stichhaltige Gründe dagegen angeben lassen, dass auf Stadt-, Hoch- und Vorortbahnen mit ihren besonderen Gleisen und Bahnhöfen eine andere Stromart verwendet wird als auf den Fernbahnen und Vorortstrecken mit weniger zahlreichen Haltestellen, besonders wenn jede Stromart für den speziellen Zweck grosse Vorteile bietet, aber, allgemein verwendet, nachteilig wird? Sollte der Übergang der verschiedenen Betriebsmittel von einer zur anderen Strecke wirklich so schwierig sein? Sollte die Stromabnahme von 1000—1500 Ampère bei 500—700 Volt nicht mindestens so sicher erfolgen, als von 100 bis 150 Ampère bei 5000—7000 Volt? Wenn der Bau von 25periodigen Einanker-Umformern manche Gemüter beunruhigt, so können sie ja auch Motorgeneratoren, event. mit nur zwei Lagern verwenden. Ich finde es etwas eigenartig, wenn man von den als „praktisch" verschrieenen Amerikanern sagt, sie hätten die rotierenden Umformer aus „theoretischem Interesse" etwas überschätzt; trotzdem sind von amerikanischen Firmen und ihren Schwestergesellschaften Hunderte von Einankerumformern mit Erfolg geliefert worden."

Im Briefkasten der Elektrotechnischen Zeitung erschienen nun die folgenden Zuschriften:

Herr Dr. Niethammer hat in seinem in No. 20 der E. T. Z. veröffentlichten Vortrage: „Über den Entwurf sehr rasch- und sehr langsamlaufender Maschinen" Gelegenheit zu einigen Bemerkungen über die Entwickelung des amerikanischen elektrischen Bahnwesens gefunden. Da es mir scheint, dass die in diesem Zusammenhange gemachten Folgerungen über die Zweckmässigkeit von Drehstrommotoren für andere als Fernschnellbahnen nicht ganz berechtigt sind, so möchte ich mir gestatten, auf die bei der Entwickelung des amerikanischen elektrischen Bahnwesens obwaltenden Verhältnisse hier zurückzukommen.

Wie bekannt, wurden in den Vereinigten Staaten zunächst nur Strassenbahnen mit Gleichstromantrieb und Gleichstromerzeugung gebaut. Bei den ersten grösseren Drehstrom-Kraftübertragungen (Niagarafall-Buffalo und Minneapolis 1898) handelte es sich um die Speisung bestehender Gleichstromnetze, und diese liess sich unter Anwendung von Drehumformern in vollkommener Weise durchführen.

Nach dem Ausbau der gleichstrombetriebenen Stadtnetze folgte die Entwickelung der Überlandbahnen (interurban railways). Diese waren wegen der grossen Strecken-

[1]) Im Gegensatz dazu Prof. Kübler, Zeitschr. f. E. u. M. No. 7, März 1902.

länge zunächst auf die Drehstrom-Kraftverteilung angewiesen, andererseits wären sie wegen der weiten Entfernung der Haltestellen voneinander — auch nach Ansicht der Herren, die den Drehstrommotor für kurze Fahrstrecken als unbrauchbar erklären, — für die Anwendung dieser Motorenart besonders geeignet gewesen. Man hat dennoch Unterstationen und Gleichstrommotoren gewählt, und zwar aus folgenden Gründen:

1. weil die Bahnen sich aus kurzen Strecken entwickelt haben, für die Gleichstrom-Kraftübertragung genügte;
2. weil sie innerhalb der Städte die Strassenbahngleise mitbenutzten und mitbenutzen mussten, da alle Hauptstrassen bereits mit Gleisen belegt waren;
3. weil die gut durchgebildeten und nur für grössere Stärken herzustellenden Gleichstrommotoren nicht geradezu ungeeignet waren für die gestellte Aufgabe, man also keinen zwingenden Grund hatte, von dem bekannten Antriebssysteme abzugehen und etwas Neues, noch Unerprobtes an dessen Stelle zu setzen.

Nun folgte zunächst die Übertragung des Drehstrom-Gleichstromsystemes auf Strassenbahnnetze (Metropolitan-Strassenbahn in New York) und alsdann auf Stadtbahnen. Die Ausbreitung dieses Systemes auf diesem Gebiete wird von Herrn Dr. Niethammer überschätzt. Heute bestehen in den Vereinigten Staaten erst zwei vollständige elektrische Hochbahnnetze: 1. in Chicago. 2. in Boston. Beide erzeugen und verwenden lediglich Gleichstrom. Die erste Drehstromübertragung besitzt die 1902 zu eröffnende Manhattan-Hochbahn; die zweite Anwendung wird auf der Brooklyner Hochbahn, die dritte auf der New Yorker Rapid Transit-Stadtbahn stattfinden.

Zu der Wahl der Gleichstrommotoren für die New Yorker Stadtbahnen ist zu bemerken:

1. dass bereits gleichstrombetriebene Hochbahnlinien in Gross-New York bestehen (Brooklynbrücken-Hochbahn und einzelne Linien in Brooklyn);
2. dass die Brooklyner Hochbahnzüge in den Aussenbezirken auf Strassenbahnen übergehen;
3. dass die Durchbildung aller Einzelheiten der Gleichstromantriebe für Hochbahn-Betriebsmittel bereits vollständig durchgeführt und nur zu übernehmen war.

Wie man sieht, war infolge der eigenartigen Entwickelung des amerikanischen Kleinbahnwesens nirgends die Möglichkeit gegeben, zwischen Gleichstrom- und Drehstrommotoren auf Grund ihrer Eigenschaften eine Auswahl zu treffen, und man wird daher aus der ausschliesslichen Anwendung von Gleichstrommotoren in Amerika ein Urteil über die Zweckmässigkeit von Drehstrommotoren für den Bahnbetrieb nicht folgern dürfen.

Altona, den 21. Mai 1902.

Schimpff.

Aus Heft 20 der E. T. Z. ersehe ich, dass Herr Dr. Niethammer bei seinem Vortrage „Über den Entwurf sehr schnell- und sehr langsamlaufender Maschinen“ Gelegenheit gefunden hat, sich gegen Ausführungen zu wenden, die ich über die Eisenbahnfrage im Verein deutscher Ingenieure gemacht und kürzlich der „Zeitschrift für Maschinenbau und Elektrotechnik“ zum Druck überlassen habe. Angegriffen wird meine Ansicht, dass man der Zugförderung durch Drehstrom-Induktionsmotoren mehr Aufmerksamkeit schenken solle, und es wird demgegenüber einiges von der Leistungsfähigkeit der amerikanischen Firmen und ihrer Schwester- (bezügl. Tochter-?) Anstalten im allgemeinen und der General Electric Co. im besonderen mitgeteilt — die ich übrigens natürlich nicht in Abrede gestellt habe, im Gegenteil! Es ist aber nun beiderseits ein Gebiet betreten, das so weitgehendes Interesse für die gesamte Elektrotechnik hat, dass wohl mit Sicherheit direkte oder indirekte Äusserungen auch von dritter Seite zu erwarten sind, die ich abwarten möchte, ehe ich auf alle Einzelheiten der Ausführungen

von Dr. Niethammer, insbesondere auf die vielleicht doch nicht ganz einwandsfreie Tabelle zum Vergleich der Motorerwärmungen eingehe. Nur der Aufforderung, mich mit der amerikanischen Literatur noch mehr zu beschäftigen, will ich sofort nachkommen und feststellen, dass diese einen Vortrag von Professor C. A. Carus Wilson vor der Inst. of mech. Eng. über die Drehstrombahn Burgdorf-Thun (Brown, Bovéri & Co.) leider bisher übersehen hat. Zu ihrer Ergänzung zitiere ich daher (aus dem Abdruck des Vortrages in „Engineering" 1900, Vol. LXX, S. 134) in deutscher Übersetzung. Wilson sagt:

„Eine der neuesten elektrischen Bahneinrichtungen mit Gleichstrom ist die auf der South Side Elevated Railway in Chicago, von der Mr. F. J. Sprague in einem vor dem American Institute of Electrical Engineers am 16. Mai 1899 gehaltenen Vortrage eine ausführliche Darstellung gegeben hat. Die Züge dieser Bahn sind aus Motorwagen zusammengestellt, die nach dem Sprague'schen „multiple-unit"-System gesteuert werden. Jeder Wagen wiegt 19 t und ist mit zwei Motoren von je $9^1/_2$ t Gewicht versehen. Der Durchmesser eines treibenden Rades ist 840 mm; das grosse Rad des Zahnrädervorgeleges hat 65, das kleine 25 Zähne, woraus sich eine Übersetzung von 2,95 : 1 ergibt. Die Spannung beträgt 653 Volt am Schaltbrett und 600 Volt am Zuge. Die Motoren sind gebaut und montiert von der General Electric Co. und berechnet für eine Maximalleistung von 52 engl. PS bei 500 Volt, obgleich sie im Dienst bedeutend geringer beansprucht werden; die maximale tatsächlich ausgeübte Zugkraft in der Horizontalen ist 840 kg. Angewendet wird das Reihen-Parallelschaltungssystem. Zum Vergleich der Wagengewichte in den zwei Fällen (nämlich Burgdorf-Thun und Chicago) geben wir an, dass jeder Motorwagen auf der Burgdorfbahn 32 t wiegt und 66 Reisende aufnimmt, so dass auf den Fahrgast 480 kg kommen. Jeder Wagen der Chicagoer Bahn wiegt 18,2 t und hat Platz für 40 Mann, wiegt also pro Fahrgast 445 kg, so dass der Unterschied nach dieser Richtung zwischen beiden Ausrüstungen gering ist.

Eine vollständige Versuchsreihe wurde in Chicago am 3. September 1898 gemacht und in dem genannten Vortrag beschrieben. Es ergibt sich, dass die Gleichstromausrüstung eine Geschwindigkeit von 37 km/Std. mit 34,7 Wattstunden pro Tonne in 30 Sekunden erreicht, gegen 41,5 Wattstunden und 28 Sekunden bei der Drehstromeinrichtung. Ähnlich ergeben die Gleichstrommotoren $38^1/_2$ km/Std. mit 39,5 Wattstunden in 37 Sekunden, gegen 45,1 Wattstunden in 30 Sekunden bei Drehstrom. Demnach brauchen bei geringerer Meistgeschwindigkeit die Gleichstrommotoren 84 % der von den Drehstrommotoren beanspruchten Arbeit, während der Prozentsatz bei höherer Meistgeschwindigkeit 87 % ist; im letzten Falle kommen indessen die Drehstrommotoren in 81 % der von den Gleichstrommotoren beanspruchten Zeit auf volle Geschwindigkeit. Die Energieersparnis bei den Gleichstrommotoren rührt von dem Reihen-Parallelschaltungssystem her.

Beim Vergleich des Maximalwertes des Verbrauches in den beiden Fällen findet man in den Kurven des Gleichstromsystemes den Höchstwert von 150 Kw für zwei oder 75 Kw für jeden Motor, gegen 53 Kw pro Motor im Versuch No. 8 mit dem Drehstromsystem. Bei einer Reihe von Versuchen in Chicago erreichte der Höchstwert 90 Kw pro Motor, aber das kam von unrichtiger Bedienung des Fahrschalters. Die grosse Mehrzahl der Versuche gab 75 Kw als Höchstverbrauch. Hieraus folgt, dass der Höchstverbrauch im normalen Dienst beim Drehstrommotor nur 70 % von dem des Gleichstrommotors ist.

Schluss. Die beschriebenen Versuche wurden zu dem Zwecke gemacht, die Eignung der Drehstrommotoren für grosse Beschleunigungen im normalen Eisenbahndienst und auch die dabei erreichbare Wirtschaftlichkeit im Vergleich mit den besten Gleichstromsystemen festzustellen. Die Resultate lehren, dass Drehstrommotoren vorzüglich[1])

[1]) Are admirably adapted to getting up speed.

für grosse Beschleunigungen geeignet sind. Ein Vergleich der Resultate mit denen, die an einer der besten und vollkommensten Gleichstromeinrichtungen gefunden wurden, zeigt, dass es nur einen sehr geringen Unterschied zwischen beiden bezüglich der Anfahrökonomie gibt. Die Gleichstrommotoren sind etwas im Durchschnittsverbrauch überlegen, während sie längere Anfahrzeit zur Erzielung hoher Geschwindigkeiten und grösseren Meistverbrauch erfordern, als die Drehstrommotoren."

Dresden, den 22. Mai 1902.

W. Kübler.

Gestatten Sie mir, auf die Briefe der Herren Schimpff-Kübler über Drehstrombahnen in E. T. Z. 1902 S. 510 folgende kurze Erwiderung:

Ausser den amerikanischen Stadtbahnen mit Gleichstrombetrieb und Drehstromübertragung sind auch noch eine Reihe Bahnen in Europa nach diesem System ausgeführt. Sie sind mir leider nicht alle gegenwärtig, ich erwähne deshalb nur die Central London Ry, eine Linie Mailand-Varese (eine zweite Linie hat bekanntlich reinen Drehstrombetrieb), ferner Paris-Orléans. Ausser den von Herrn Schimpff angegebenen Gründen zur Bevorzugung des Gleichstrombetriebes auf Stadtbahnen waren tatsächlich für die amerikanischen Ingenieure die wesentlich bessere Ökonomie, die geringere Erwärmung beim Anfahren und die Regulierfähigkeit der Gleichstrommotoren ausschlaggebend. Prof. Kübler gibt leider keine eigenen Beweise für seine Behauptungen, sondern ein meines Erachtens schlecht gewähltes Zitat, und zwar, weil es nicht von kompetenter praktischer Seite herrührt und überdies eine Stadtbahn mit einer Fernbahn verglichen wird. Bekanntlich habe ich in meinem Aufsatz nur für Stadtbahnen bezw. für Bahnen mit kurzen Bahnhofsabständen zur Vorsicht bezw. der Verwendung von Drehstrommotoren gemahnt. Zudem kommt Wilson, was die Effektverluste anlangt, zu demselben Resultat, wie ich bezw. E. J. Berg, den ich zitierte; die Frage des momentanen Maximalbedarfs habe ich gar nicht tangiert, er beeinflusst übrigens viel mehr die Generatoren, als die Motoren. Dass der Drehstrommotor bei sonst gleichen Verhältnissen kleineren Maximalverbrauch und rascheres Anfahren gestatten soll, glaube ich ohne ausführliche Beweisführung nicht. Auch bemerke ich noch, dass der Stromverbrauch beim Anfahren um so geringer ist, je rascher er beschleunigt wird; die von Wilson angezogenen Vergleiche der Effektverluste sind also zu Ungunsten des Gleichstrommotors aufgestellt, oder sollte ein mit Drehstrom beförderter Fahrgast dem Drehstrom zuliebe eine grössere Beschleunigung, ein stossweiseres Anfahren zulassen, als bei Gleichstrom?[1]) Ich kann nur meine frühere Aufforderung — Prof. Kübler hat nur englische Literatur zitiert — wiederholen, die gegenteiligen Beweise möchten so ausführlich gehalten werden, wie die Ausführungen des Herrn E. J. Berg in „Street Railway Journal" und „Electrical World" vom Jahre 1901.

Westend-Berlin, den 10. Juni 1902.

Dr. F. Niethammer.

Nach den ausführlichen Darlegungen des Herrn Dr. Niethammer in der E. T. Z. Heft 20 u. 26, die spezielle Verwendung von Drehstrommotoren für Hoch- und Vorortbahnen betreffend, könnte man leicht zu der Ansicht neigen, dass solche Motoren, die ein häufiges Anfahren erfordern, gegenüber den Gleichstrommotoren unzweckmässig bezw. untauglich wären. Herr Dr. Niethammer bemängelt bei den meist in ihren äusseren Dimensionen gegebenen Motoren die in denselben auftretenden hohen Effektverluste und eine dadurch bedingte unzulässige Erwärmung. Er begründet diese Anschauung unter Hinweis auf einen tabellarischen Vergleich eines 200 PS-Gleichstrom-

[1]) Vergl. hierzu S. 27.

motors gegen einen solchen des Drehstromes, wonach sich ergibt, dass ersterer im Moment des Anfahrens 44 PS, letzterer dagegen 98 PS absorbiert. Wenngleich ich dieses Resultat unter der darin gemachten Voraussetzung nicht anzweifeln möchte, so scheint mir dasselbe doch zu einseitig beurteilt und mehr zu Gunsten des Gleichstrommotors aufgestellt zu sein. Denn was nützt uns, wie Herr Dr. Niethammer sagt, „unter sonst gleichen Verhältnissen“ solche zu wählen, wenn man mit anderen Verhältnissen bessere Resultate erzielen kann. Ich meine also, woran liegt es, dass der Hauptstrommotor so viel günstigere Werte als der Drehstrommotor zeitigt? Doch lediglich daran, dass gleichzeitig mit der hohen Stromaufnahme beim Anlauf auch das magnetische Feld mit verstärkt wird, wodurch, da die Zugkraft des Motors proportional der

$$\text{Feldstärke} \times \text{Stromstärke}$$

ist, der Maximalstrom für ein bestimmtes Anfahrmoment kleiner als das Mehrfache des Drehmomentes ausfällt, mithin auch der dem Quadrate dieses Stromes proportionale Wärmeverlust.

So findet Herr Dr. Niethammer für ein 3faches Drehmoment eine $2^1/_2$fache Stromstärke beim Gleichstrommotor, dagegen die 3,5fache beim Drehstrommotor, d. h. wenn

$N_g = C_1 \cdot \frac{D}{J_g}$ das Feld bei normaler Belastung des Gleichstrommotors,

$N_d = C_2 \cdot \frac{D}{J_d}$ das Feld bei normaler Belastung des Drehstrommotors ist,

C_1 und C_2 = Konstanten,
D = normales Drehmoment,
J_g = normale Stromstärke des Gleichstrommotors,
J_d = normale effektive Stromstärke des Drehstrommotors,

so ändern sich diese beiden Felder N_g und N_d bei dem 3fachen Drehmoment auf:

$$N_{g3} = C_1 \cdot \frac{3\,D}{2{,}5\,J_g} = 1{,}2\ N_g,$$

$$N_{d3} = C_2 \cdot \frac{3\,D}{3{,}5\,J_d} = 0{,}85\ N_d.$$

Diese Abnahme des Feldes ist also den gewöhnlichen Drehstrommotoren nachteilig und erinnert an das Verhalten des Nebenschlussmotors. Für den speziellen Fall aber, wie er hier bei Bahnen vorkommt, gestattet nun die besondere Eigenschaft des Drehstrommotors, diesem Übelstande in wirksamster Weise zu begegnen, indem einfach der Motor durch die drei Phasen mit der 1,73fachen Spannung erregt wird, d. h. der Motor von der Stern- in die Dreieckschaltung umgeschaltet wird, oder — was dasselbe ist — die Phasen des den Motor speisenden Transformators in umgekehrter Reihe umgeschaltet werden. Letztere Anordnung hatte die Firma Siemens & Halske A.-G. bei ihren Schnellbahnwagen gewählt.

Der Erfolg ist, dass das Feld 1,73mal so gross wird oder nach obigem der Strom für das 3fache Drehmoment in den Motorphasen

$$J_{d_3} = C_2 \cdot \frac{3\,D}{1{,}73\ N_d} = 1{,}73\ J_d$$

beträgt. Die Ohm'schen Kupferverluste im ganzen Drehstrommotor werden dann mit dem Mittel der primären und sekundären Ampère-Windungen

$$\left(\frac{1{,}73}{3{,}5}\right)^2 = \sim \frac{1}{4}$$

derjenigen in der gewöhnlichen Normalschaltung (bei 3fachem Drehmoment) betragen. Dagegen wird der Eisenverlust während der Anfahrzeit grösser. Nimmt man an, dass

die Effektverluste im Eisen mit der 1,8. Potenz der Feldinduktion zunehmen, so würden bei obiger Umschaltung die Eisenverluste

$$1{,}73^{1,8} = \sim 2{,}7$$

so viel als bei der gewöhnlichen Schaltung betragen.

Setzt man diese neuen Werte der Verluste beim Anfahren in die Tabelle des von Herrn Dr. Niethammer angegebenen Beispiels eines 200 PS-Motors mit ca. 94 % Wirkungsgrad hinein, so ergibt sich folgendes:

	Gleichstrom		Drehstrom	
	200 PS Lauf PS	3faches Anfahrmoment PS	200 PS Lauf PS	3faches Anfahrmoment PS
Ankerkupfer	3,5	22	3,5	10,5
Erregerkupfer	3,5	22	3,5	10,5
Eisenverlust	5,0	0	5,0	13,5[1])
Summe	12	44	12	34,5

Man ersieht aus dieser Tabelle, dass der Drehstrommotor gerade beim Anfahren in Bezug auf die Erwärmung ausserordentlich geschont werden kann, oder mit anderen Worten, dass bei Zulassung gleicher Verluste wie beim Gleichstrommotor ersterer während der Beschleunigungsperiode dem letzteren überlegen ist. Dieser Umstand tritt um so günstiger hervor, je grösser das Verhältnis der gesamten Kupferverluste zu den Eisenverlusten bei Normalleistung ist. Ähnliche Vorteile erhält man auch mit der Umschaltung während der Bremsperiode in Kaskadenschaltung.

Ist ferner der Drehstrommotor so berechnet, dass sein Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bei der Normalleistung (Sternschaltung) ein Maximum ist, so spricht noch ein günstiger Umstand für die Umschaltung auf Dreieck, als zum Anlauf mit dem 3—3,5fachen Drehmoment der Leistungsfaktor gerade wieder ein Maximum wird, weil Feld und Strom gleichmässig zunehmen. Zu erwägen wäre nur, dass der Magnetisierungsstrom bei der Umschaltung durch hohe Sättigungen im Eisen nicht zu sehr zum Ansteigen gezwungen wird. Letzteres ist aber bei den Drehstrommotoren wegen des kurzen Kraftlinienweges im Stator und Rotor und des geringen Luftraumes, besonders bei der üblichen Periodenzahl 50, nicht der Fall, um so mehr nicht, als bei Überschreitung eines zu hohen Leerlaufsstromes für „Normalleistung“ der Leistungsfaktor zu klein ausfallen würde.

Was die Leistungsfähigkeit oder Grösse der Bahnmotoren anbelangt, so glaubt Unterzeichneter, dass gerade der Drehstrommotor am geeignetsten ist, die sich ihm entgegenstellenden Anforderungen, grösste Leistung bei gegebenem kleinsten Raumbedarf, höchster Wirkungsgrad bei besten Abkühlungsverhältnissen, am leichtesten zu erfüllen. Insbesondere kann bei einem gegebenen äusseren Motordurchmesser der Ankerdurchmesser, mit dem bekanntlich die Leistung quadratisch wächst, beträchtlich grösser werden als beim Gleichstrommotor — wenigstens nach den jetzt bekannten Anordnungen —. Am günstigsten stehen in dieser Beziehung diejenigen Drehstrommotoren da, deren induzierter Teil (Anker) fest steht. Denn bei diesen kann das äussere Eisenblechpaket der niedrigen Periodenzahl oder Ummagnetisierungsarbeit wegen hoch gesättigt, daher kleinen Querschnitt, bezw. eine grosse Bohrung bekommen, wodurch bei ungefähr

[1]) Hierbei ist im Gegensatz zu Dr. Niethammer angenommen, dass die Eisenverluste beim Stillstand und Lauf gleich sind, was bei den in der Praxis ausgeführten Motoren meistens zutrifft oder sich wenigstens nicht viel unterscheidet. — Siehe auch Dr. Benischke, E. T. Z. 1901, S. 699.

gleichem Eisen- und Kupferaufwand der älteren Anordnung gegenüber Leistung und Wirkungsgrad nicht unwesentlich steigen.

Für den Fall einer unpassenden Perioden- oder Umdrehungszahl bei besten Motordimensionen oder um überhaupt Drehstrommotoren mit höherer Tourenzahl bei Anwendung einer Übersetzung bequem anordnen zu können, schlägt Unterzeichneter vor, eine sogenannte „mechanische Kaskadenschaltung" eines oder zweier Motoren vorzunehmen. Diese beruht darauf, Gehäuse und Anker um die Laufradachse des Motorwagens rotieren zu lassen, wobei ein Teil, z. B. der Anker, die Laufradachse nach rechts, der andere Teil (Gehäuse) linkslaufend entweder eine zweite Laufradachse durch ein mechanisches Getriebe in Bewegung setzt oder aber den in passender Drehrichtung befindlichen Teil eines zweiten Motors zwangläufig verbindet. Beide Motoren auf einer Achse angeordnet, werden zweckmässig so gekuppelt, dass je ein Anker des einen mit dem Gehäuse des anderen Motors starr verbunden ist, so dass beide Motoren einer Laufradachse je nach der zwangläufigen, mit entsprechender Übersetzung gewählten Verbindung die gewünschte Umdrehungszahl erteilen. Laufen demnach Anker und Ständer mit gleicher Geschwindigkeit, so würde ein für 200 PS und 50 Perioden berechneter 4poliger Motor, direkt auf der Laufradachse angeordnet, ca. 750 Umdrehungen ergeben. Anker und Gehäuse übertragen dabei je 100 PS, zusammen aber wieder 200 PS. Ebenso könnte man durch Änderung der zwangläufigen Verbindung von Gehäuse und Anker bei demselben Motor jede beliebige, aber bestimmte Tourenzahl erhalten.

Berlin, den 5. Juli 1902.

E. Ziehl.

Den Anforderungen, die aus Herrn Dr. Niethammers Kritik meines letzten Briefes herauszulesen sind, werde ich bemüht bleiben, nach Möglichkeit völlig zu entsprechen; in einem Punkte kann ich seinen Wünschen sogleich nachkommen. Er verlangt statt des englischen ein amerikanisches Zitat. Ich gebe dies aus demselben Aufsatz, den auch Dr. Niethammer anführte, von E. J. Berg, „Street Railway Journal" 1901, S. 213, indem ich wieder verdeutsche:

„Da die Kosten des motorischen Teiles einen bedeutenden Teil bei der Erstellung einer Anlage ausmachen und da Gleichstromausrüstungen in den Vereinigten Staaten in so hohem Maſse zu Normalkonstruktionen durchgebildet und bis zum äussersten verbilligt sind, so liegt hierdurch jedenfalls ein besonderer Grund dafür vor, warum bei sorgfältiger Prüfung es nicht nur mit Rücksicht auf den Verbrauch, sondern auch im Hinblick auf die Anlagekosten wirtschaftlich richtig erscheint, Drehstrom-Gleichstromumformer an Stelle von direkten Drehstromsystemen einzurichten. In Ländern dagegen, wo das Gleichstromsystem noch nicht so weit getrieben worden ist, könnte der Unterschied der Kosten beider Systeme geringer sein, und das spricht dafür, für einige europäische Unternehmungen Drehstrommotoren vorzusehen."

Soweit Berg; sehr wesentlich scheint also sein abschliessendes Urteil von dem meinigen nicht abzuweichen; wie weit das doch der Fall ist, werde ich mir gestatten, bei Erledigung der anderen Wünsche von Dr. Niethammer festzustellen.

Dresden, den 12. Juli 1902.

W. Kübler.

Inzwischen war in der Diskussion[1]) des Niethammer'schen Vortrages auch noch das Folgende gesagt worden:

Professor Görges: Ich möchte mir im Auftrage meines Kollegen, Herrn Professors Kübler, eine Bemerkung erlauben. Ich muss bekennen, dass ich selbst noch

[1]) Im elektrotechnischen Verein in Berlin.

nicht Zeit gehabt habe, den Vortrag des Herrn Dr. Niethammer durchzulesen. Herr Professor Kübler hat mich gebeten, mitzuteilen, dass er eine kleine Notiz an die Redaktion der E. T. Z. eingesandt hat über einen Artikel aus dem „Engineering“, in dem ein Vergleich gemacht wird zwischen einer verhältnismässig neuen Anlage in Chicago auf der Hochbahn mit Gleichstrommotoren der General Electric Company und mit Drehstrommotoren der Burgdorf-Thun-Bahn von Brown, Bovéri & Co. Die Motoren arbeiten unter ganz ähnlichen Verhältnissen. Nach diesem Vergleich stellt sich der Betrieb mit Drehstrommotoren ausserordentlich günstig. Zum Anfahren ist bei den Drehstrommotoren etwas mehr Arbeit erforderlich, dafür laufen sie aber etwas schneller an. Ich kann die Zahlen kurz mitteilen.

Die Gleichstrommotoren der Hochbahn in Chicago erreichen eine Geschwindigkeit von 23 Meilen pro Stunde mit 34,7 Wattstunden pro Tonne. Bei Drehstrom wird dieselbe Geschwindigkeit erzielt bei 41,5 Wattstunden pro Tonne. Dabei beträgt die Anfahrzeit bei Gleichstrom 30 Sekunden, bei Drehstrom 28 Sekunden. Wenn man 24 Meilen pro Stunde erreichen will, so sind die Verhältnisse für Drehstrom noch günstiger. Die Gleichstrommotoren gebrauchten hierbei 39,5 Wattstunden, die Drehstrommotoren 45,1 Wattstunden. Dabei ist die Anfahrzeit bei Gleichstrom 37, bei Drehstrom 30 Sekunden. Der maximale Bedarf ist bei Gleichstrom 75, bei Drehstrom 53 Kw überhaupt.

Der Verfasser des Artikels kommt zu dem Schluss, dass die Mehrphasenmotoren bewunderungswürdig geeignet sind, grosse Beschleunigung zu geben. Das Nähere wird in der E. T. Z. erscheinen.

Dr. Niethammer: Ich kann natürlich diese Zahlen des Herrn Professors Kübler hier nicht direkt kontrollieren; es wird jedenfalls interessant sein, dieselben einer vergleichenden näheren Untersuchung zu unterziehen. Ich möchte nur noch erwähnen, dass auch verschiedene andere Firmen, z. B. Örlikon, dazu übergegangen sind, Drehstrom zur Übertragung und Gleichstrom zum Antrieb der Motoren zu verwenden, weil die Verhältnisse beim heutigen Stande der Elektrotechnik für Drehstrom bei oftmaligem Anfahren und vollends bei Tourenreguliernng äussert ungünstige werden. Die erwähnten Zahlen würde ich gern an der Hand der genauen Veröffentlichung diskutieren; heute lässt sich das nicht recht ermöglichen.

Dann möchte ich Herrn Prof. Görges noch auf einen Satz in meinem Vortrage hinweisen, nämlich dass E. J. Berg in „Street Railway Journal“ nachgewiesen hat, dass bei einer Vorortbahn, wie sie bei uns und in Amerika in diesen Verhältnissen vorkommen wird, für reinen Drehstrombetrieb 26 % mehr Effekt = 2,2 mal so viel Voltampère notwendig sind, als für das Drehstrom-Gleichstromsystem, und da möchte ich betonen, dass dieser Aufsatz von Berg über den zahlenmässigen Vergleich beider Systeme sehr ausführlich gehalten ist und ich keinen Fehler darin entdecken konnte. Ich wünsche, dass Herr Prof. Kübler dies in gleicher Weise tun möchte, damit man beide Abhandlungen kritisch vergleichen kann, denn die Resultate, zu denen Herr Prof. Kübler gekommen ist, stehen in direktem Widerspruch zu denen von Berg.

Prof. Görges: Es sind einfache Zahlen aus einem Aufsatz. Wenn ich mich recht erinnere, so hatten Sie Herrn Prof. Kübler den Vorwurf gemacht, dass er die amerikanische Literatur nicht genügend verfolgt hätte. (Zustimmung.) Nun beruft sich Herr Prof. Kübler auf englische Literatur, die zum Teil gerade aus der amerikanischen herausgenommen ist, zum anderen Teil aber gerade in dieser Literatur vermisst wird.

Dr. Niethammer: Derartige vergleichende Berechnungen wird man bei der Wichtigkeit der Frage mit Dankbarkeit aufnehmen, aber sie sollten so ausführlich wie möglich gehalten sein.

Diese ganze Diskussion brachte mich zu dem Entschlusse, zunächst noch einmal die strittigen Punkte eingehend in der Praxis zu studieren

und dann im Zusammenhange eine Klarstellung der ganzen Frage zu versuchen.

Ich verdanke es der grossen Liebenswürdigkeit der Direktion der Burgdorf-Thun-Bahn und der Firma Brown, Bovéri & Co. in Baden, beide in der Schweiz, dass mir reichlichste Gelegenheit geboten wurde, mich über die Resultate eines nunmehr dreijährigen Drehstromeisenbahn-Betriebes genau zu unterrichten. Ich konnte die Messungen ausführen, die im folgenden benutzt werden sollen, und auch hierbei fand ich viel freundliche Hilfe, namentlich durch die Mitarbeit der Herren Ingenieure Krähenbühl (von der Burgdorf-Thun-Bahn) und Morgenthaler (von der Firma Brown, Bovéri & Co.), sowie meiner Schüler der Herren Weissbach und Beck.

Es entbehrt nicht eines gewissen Humors, dass uns, die wir von Dresden nach Burgdorf fuhren, No. 40 der Württembergischen Eisenbahn-Zeitung, VI. Jahrgang, 30. September bis 6. Oktober 1902 mit folgendem Artikel in den Wagen gereicht wurde, der den Wert aller Arbeiten auf dem auch von uns betretenen Gebiet für die Allgemeinheit illustriert:

Dampf oder Elektrizität im Schnellverkehr.

Im Berliner Verein für Eisenbahnkunde hielt Eisenbahnbauinspektor Fränkel einen Vortrag über „Dampflokomotive und Schnellverkehr", in dem er nach der „Reform" im wesentlichen folgendes ausführte: „Die Einführung elektrischen Betriebes auf Vollbahnen wird häufig wegen der zu erwartenden wirtschaftlichen Vorteile empfohlen, die man sich insbesondere durch die in grossen Zentralen billig herzustellende Kraft verspricht, die nach Umwandlung in Elektrizität und Leitung nach den betreffenden Bahnlinien zur Zugförderung nutzbar gemacht werden soll. Hierbei entstehen selbstverständlich Kraftverluste, die ein solches Mafs erreichen, dass die Krafterzeugung in der Lokomotive bereits eine etwas günstigere wird. Dieses Verhältnis vergrössert sich aber wesentlich zu Ungunsten des elektrischen Betriebes, weil die vom Betriebe bedingten langen Züge, die sich nicht gleichmässig über die Tagesstunden verteilen, sehr grosse Kraftschwankungen im Gefolge haben, denen die elektrische Übertragung weder wirtschaftlich noch technisch gewachsen ist. Bestehende Fahrpläne einer stark befahrenen Bahn weisen Schwankungen im Kraftbedarf von 1200—6000 PS auf; es lassen sich auf solchen Linien kaum mehr kleinere Züge führen, da die Zugfolge schon eine dichte ist und auf den Bahnhöfen für Rangierzwecke gewisse Zeit bleiben muss, auch die Stationsbeamten für die Betriebs- und Sicherheitsvorrichtungen die nötige Musse haben müssen, wenn nicht Unfälle eintreten sollen. Ist die Wirtschaftlichkeit elektrischer Bahnen aber eine ungünstige, so bleiben, abgesehen von der schon der Beseitigung nahen Rauchplage, nur noch ungünstige Eigenschaften der elektrischen Bahnen übrig, vor allem die besonders in Kriegszeiten verhängnisvolle Abhängigkeit von den elektrischen Drahtleitungen. Auch im Auslande, z. B. Amerika, wo man von jeher für elektrische Vollbahnen schwärmte, ist eine starke Ernüchterung eingetreten. So ist die wohl älteste elektrische Linie der Pennsylvaniabahn wieder mit Dampfbetrieb versehen worden. Auch für den „elektrischen Schnellverkehr" ist wenig Aussicht vorhanden, da die Kraftverluste hier wegen der grossen erforderlichen Kräfte besonders kostspielig, die Motorwagen sehr schwer und ebenfalls teuer sind und endlich die Betriebssicherheit wegen der Zerstörung der Oberbaue gering ist; der elektrische Betrieb würde für

Vollbahnen bei der heutigen Technik einen Rückschritt bedeuten. Viel günstiger nach allen Richtungen verhält sich die für Schnellverkehr ausgerüstete Dampflokomotive, die ausserdem den Vorteil bietet, mehrere Wagen auf einmal zu befördern. Will die Elektrotechnik die Bahn erobern, so muss sie bei den ländlichen Nebenbahnen anfangen, wo kleinere Kräfte erforderlich sind und wo zur Verbilligung der Krafterzeugung aus den Zentralen die gerade nach dieser Richtung notleidende Landwirtschaft der Umgegend mit Kraft für die verschiedenen Maschinen und für das elektrische Pflügen versehen werden müsste. Bei diesen ländlichen Kraftzentralen wäre auch die Möglichkeit vorhanden, die bisher zu wenig ausgenutzten Wasser- und Windkräfte in einem einheitlichen elektrischen Sammelnetze auszunutzen und so die Unkosten zu Gunsten der Landwirtschaft und der Nebenbahnen weiter zu verbilligen. Hier ist der Platz für die Elektrotechnik; wären dagegen die elektrischen Bahnen zuerst erfunden worden, so hätte man die frei und unabhängig von einer Zentrale die Welt mit Kultur überziehende Dampflokomotive als grösste Erfindung des Jahrhunderts gepriesen.

Erster Abschnitt.

1. Der Charakter irgend einer Eisenbahn, also auch der der elektrischen Bahn, ist bedingt durch ihre Lage, ob in der Strasse oder auf eigenem Bahnkörper, ob im Gebirge oder flachen, im dicht bevölkerten oder öden Land, während durch blosse Verwaltungsrücksichten bedingte Sondereigenschaften nicht als grundsätzliche, sondern nur als zufällige angesehen werden können. Die weitaus wichtigste Trennung im elektrischen Eisenbahnbetrieb an sich hat man daher zwischen Strassenbahn und Bahn auf eigenem Bahnkörper zu machen.

2. Für die heutigen elektrischen Strassenbahnen ist bei uns mafsgebend, dass sie sich den Störungen durch anderen Fuhrwerksverkehr in weitestem Mafse unterwerfen müssen, also einen bestimmten Fahrplan nur ungefähr einhalten, unveränderliche Geschwindigkeiten überhaupt nicht beibehalten und verhältnismässig niedrige Meistgeschwindigkeiten nicht überschreiten können.

Innerhalb der Grossstädte ist im allgemeinen das Strassenbahnnetz ausgebaut; die Betriebsmittel sind vorhanden und befriedigen fürs erste, ein Bedürfnis zu ihrer Abänderung liegt nicht vor, die ganze Sache ist, soweit eine grundsätzliche Beurteilung in Frage kommt, erledigt und ein Eingehen auf Einzelheiten etwa möglicher anderer Systeme entbehrt im Augenblick des praktischen Interesses.

3. Wesentlich anders ist die Sachlage für die „eigentlichen" Eisenbahnen, auf denen ausser einigen schüchternen Versuchen im kleinen und dem grossartigen Schnellbahnversuch auf der Marienfelde-Zossener Strecke und ausser einigen von Privatunternehmungen gebauten Stadtbahnen für elektrischen Betrieb in Deutschland bisher die Elektrizität noch keine Gelegenheit gefunden hat, ihre Vorzüge zu beweisen.

4. Der Grund für dieses scheinbare Zurückbleiben ist im wesentlichen ein finanzieller: wenn es sich darum handelt, die bewährten Betriebsmittel einer sehr grossen Anlage zu einer Zeit durch neue zu ersetzen, wo die alten Kapitalien noch nicht getilgt sind, so kann das nur dann statthaft erscheinen, wenn für den Übergang mit Sicherheit eine gesunde wirtschaftliche Grundlage nachgewiesen werden kann. Man hat also vor allem zu prüfen, ob der elektrische Betrieb Betriebsersparnisse von bedeutender Höhe in Aussicht stellt.

5. Ersparnisse ergeben sich für einen Eisenbahnbetrieb unter anderen
   a) durch Erhöhung der Leistungsfähigkeit,
   b) durch Erhöhung der Betriebssicherheit,
   c) durch Vereinfachung des Dienstes,

und namentlich nach diesen Richtungen hin will der elektrische Betrieb Vorzüge zur Verfügung stellen, die dem Dampfbetrieb nicht eigen sind.

6. Die Leistungsfähigkeit muss nach verschiedenen Richtungen entwickelt werden, je nachdem, ob es sich um lokalen oder Fernverkehr, Personen- oder Güterbeförderung handelt, wenn auch darin Übereinstimmung bestehen wird, dass man bestrebt sein muss, die jeweilig vorliegenden Aufgaben mit kürzester Fahrzeit und geringstem Materialaufwand zu bewältigen.

7. Betrachtet man die graphische Darstellung einer Fahrt von *A* nach *B* (Fig. 2), so ersieht man, dass man zu unterscheiden hat zwischen

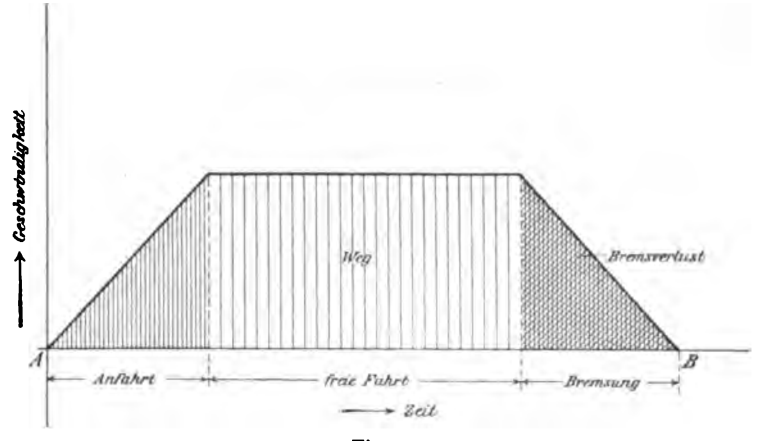


Fig. 2.

drei in den Betriebsbedingungen wesentlich verschiedenen Perioden: der Anfahrt, in der eine „Ladung der Massen mit Arbeitsvermögen" stattfinden m u s s, der freien Fahrt, in der entweder, wie in Fig. 2 angenommen, das Arbeitsvermögen konstant bleibt oder durch eine schwache „Entladung der Massen" etwas verringert wird, und der Bremsung", bei der die „Ladung der Massen" vernichtet wird.

8. Wenn die freie Fahrt sich über einen langen Zeitraum erstreckt, so tritt der Einfluss der Anfahrt und Bremsung so weit zurück, dass er nicht mehr als massgebend anzusehen ist, wir haben den Fall einer sogenannten F e r n b a h n. Im anderen Fall, der namentlich dem Stadtbahnverkehr entspricht, gibt die „Ladung" für die Wahl der Antriebseinrichtungen die entscheidenden Bedingungen.

9. Die „Ladung" bedeutet einen Arbeitsbetrag, der als verloren anzusehen ist, wenn die Bremsung dadurch bewirkt wird, dass man das

Arbeitsvermögen der Massen in einer Form vernichten lässt, die eine erneute Ausnutzung desselben Arbeitsquantums ausschliesst, also z. B. durch Erzeugung von Wärme zwischen Radbandage und Bremsklotz.

10. Die Figur zeigt, dass man aus der graphischen Darstellung in der (schraffierten) Fläche zwischen der Abszissenachse und der Geschwindigkeitskurve ein Maſs des durchlaufenen Weges hat, denn die Ordinaten bedeuten Weg durch Zeit und die Abszissen Zeit. Es ist ohne weiteres klar, dass bei gegebener Fahrzeit und gegebenem Weg eine verschiedenartige Betriebsanordnung möglich ist, deren Richtigkeit an der Hand der Figur — durch Ausmessen der Fläche — geprüft werden kann.

Während Fig. 2 den Fall behandelte, dass die „Massenladung" bei der Anfahrt in derselben Weise geschehen sollte, wie die Massenentladung bei der Bremsung, dass also der Bremsverlust gleich der Ladung

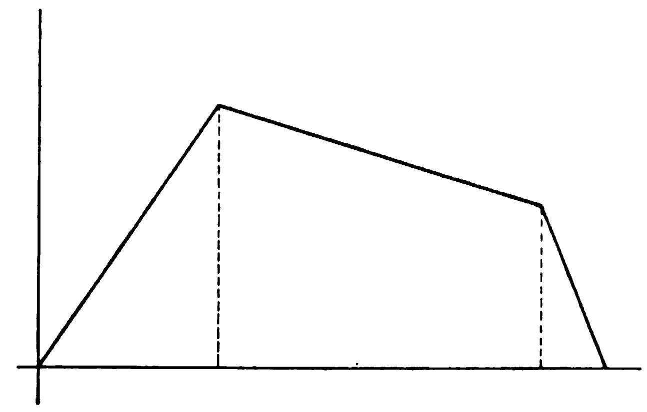


Fig. 3.

sein sollte, zeigt Fig. 3 den Fall, dass die Massenentladung ausgenutzt wird, um während der freien Fahrt die Rollwiderstände zu überwinden. Dieser Fall ist in Bezug auf Arbeitsverbrauch entschieden günstiger, weil er gestattet, den Zug auf der freien Fahrt ohne Energiezufuhr von aussen her laufen zu lassen. In Bezug auf die vom Zuge aufgenommene grösste Leistung pro Stunde ist er ungünstiger. Bei der „Ladung der Massen" muss ja eine Zugkraft auf den Zug wirken, die nach dem Diagramm konstant bleibt, weil die Geschwindigkeit bis zum Höchstbetrage gleichmässig zunimmt. Da die sekundliche Leistung dem Produkt Geschwindigkeit $\times$ Kraft entspricht, so ist am Ende der Anfahrt die Leistungsaufnahme des Zuges eine bedeutende, wir können sie berechnen aus

$$\text{Leistung} = \text{Masse} \times \text{Geschwindigkeit} \times \text{Beschleunigung}.$$

11. Die Höchstleistung bedingt eine entsprechende Bemessung der Antriebsmaschine. Dampflokomotiven lassen bei kurzer Entfernung der

Stationen eine Fahrt nach dem Plane in Fig. 3 kaum zu; mit Elektromotoren lässt sie sich verwirklichen, vorausgesetzt, dass nicht nur die Motoren, sondern auch das Krafthaus und die Stromzuleitungen der Höchstleistung entsprechend bemessen werden.

12. Es ist aber nicht jede Art von Elektromotoren hierfür in gleicher Weise geeignet; es stehen zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Motoren zur Verfügung:

a) Motoren, die bei allen Geschwindigkeiten zwischen Stillstand und voller Umdrehungszahl gleichbleibende Drehmomente abgeben können:
 α) bei Gleichstrombetrieb Nebenschlussmotoren,
 β) bei Wechselstrombetrieb Drehstrom-Induktionsmotoren;

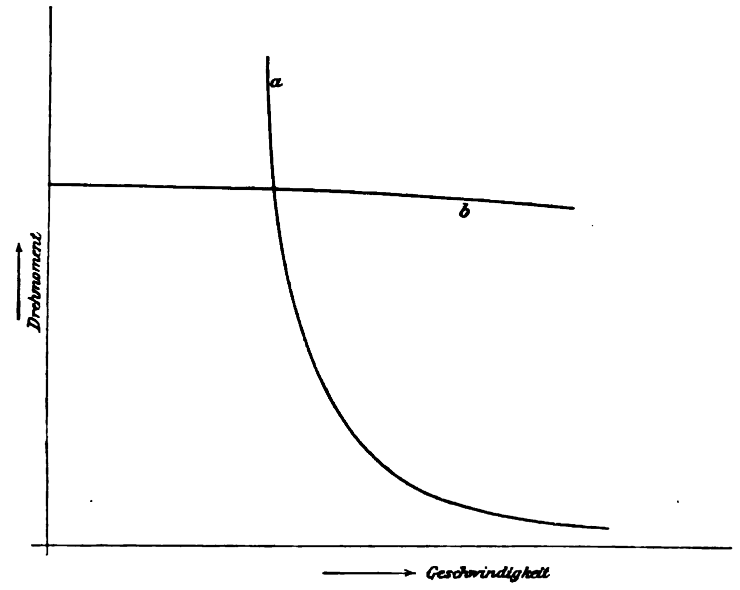


Fig. 4. a = Drehmoment des Reihenschlussmotors. b = Drehmoment des Nebenschluss- und Drehstrommotors bei normaler Stromstärke.

b) Motoren, bei denen das Drehmoment eine Funktion der Geschwindigkeit ist:
 α) bei Gleichstrombetrieb } Reihenschlussmotoren.
 β) bei Wechselstrombetrieb }

Fig. 4 zeigt den Verlauf des Drehmomentes als Funktion der Geschwindigkeit für die verschiedenartigen Motoren.

13. Zeichnet man mit Hilfe der Zugkrafts-Charakteristik ein Fahrdiagramm für eine Fahrt nach Fig. 3, so ergibt sich das Bild Fig. 5, aus dem ersichtlich ist, dass der Bremsverlust für Drehstrommotoren und Nebenschlussmotoren ein geringerer ist, als der für Reihenschlussmotoren. Dieser Unterschied lässt sich ausgleichen, wenn man für Reihenschlussmotoren eine grössere Anfangsbeschleunigung zulässt, wie es Fig. 6 zeigt;

ja es lässt sich dann sogar eine kleine Verringerung der Meistgeschwindigkeit erreichen. Unzweifelhaft wird auch nicht nur jetzt, sondern auch vorher der Höchstwert der Leistung am Ende der Anfahrt ein geringerer

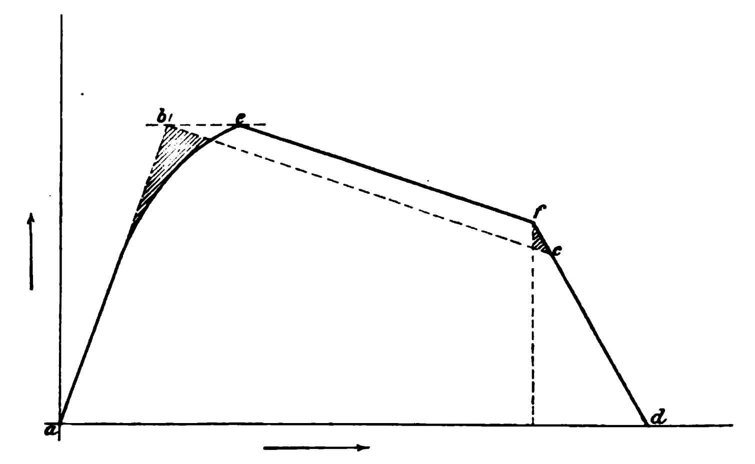


Fig. 5. *abcd* = Fahrt mit Nebenschluss- oder Drehstrommotoren. *aefd* = Fahrt mit Reihenschlussmotoren. Anfangsbeschleunigungsdruck gleich; mechanische Konstruktion des Wagens gleich.

als bei Drehstrom- und Nebenschlussmotoren, weil sich ja die Beschleunigung gegen das Ende der Massenladung hin verringert.

14. Nachteilig für den Reihenschlussmotor ist dann aber, dass, da bei Beginn der Zugbewegung die Beschleunigung eine sehr grosse ist,

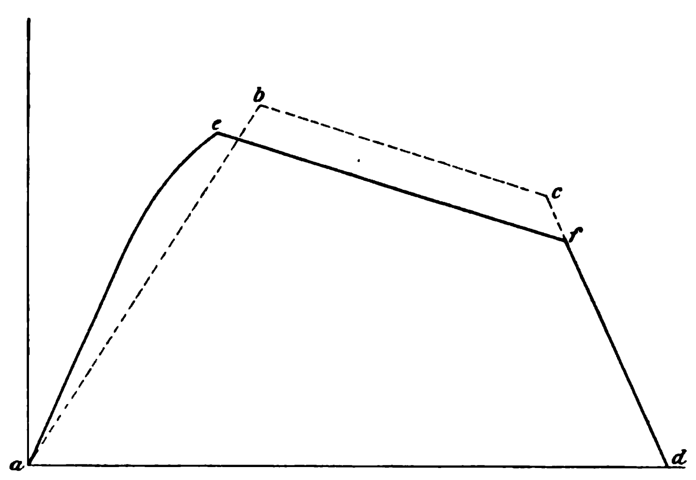


Fig. 6. *abcd* = Fahrt mit Nebenschluss- oder Drehstrommotoren. *aefd* = Fahrt mit Reihenschlussmotoren. Anfangsbeschleunigungsdruck verschieden; mechanische Konstruktion der Wagen verschieden.

auch bedeutende mechanische Kräfte zur Wirkung kommen, alle Triebteile also entsprechend schwerer gebaut werden müssen.[1]) Aus Fig. 6 lesen

[1]) Fig. 6 entspricht einem praktischen Fall, der später weiter verfolgt wird. Vergl.

wir ein Verhältnis dieser Kräfte entsprechend dem Verhältnis der Beschleunigungen von 20 : 16,5 ab, d. h. in diesem Falle ist die Beanspruchung aller Triebteile bei Reihenschlussmotoren 21 % grösser als bei Drehstrom- oder Nebenschlussmotoren.

15. Es ist selbstverständlich dies Resultat kein allgemein gültiges; eine Verschiebung der Zahlen tritt ein, wenn

a) die Stationsentfernung sich ändert,
b) die Drehmoments-Charakteristik des Reihenschlussmotors geändert wird, was auf verschiedene Weise erreicht werden kann;

es bleibt aber das Resultat unter allen Umständen gültig, dass entweder grosse Höchstleistung oder grosse Triebwerksbeanspruchung zugelassen werden muss; will man beides ausschliessen, so muss man den Vorteil aufgeben, die Ladung der Massen durch allmähliche Entladung auf der freien Fahrt auszunützen, und grössere Bremsverluste zulassen.

16. Alles in allem ergeben die Betrachtungen dieses Abschnittes, dass auf Grund einer Prüfung der rein mechanischen Bedingungen der Fahrt die Vorteile und Nachteile der verschiedenen Arten von Elektromotoren sich gegeneinander ausgleichen.

Zweiter Abschnitt.

17. Die verschiedenen Elektromotoren haben das miteinander gemein, dass zur Entwicklung eines bestimmten Drehmomentes dem Motor eine bestimmte Stromstärke zugeführt werden muss. Bekanntlich kommt das Drehmoment dadurch zustande, dass sich zwischen dem im Motor erzeugten Magnetismus und den Strömen in der Wicklung des Ankers mechanische Kräfte geltend machen, aus denen ein tangentialer Zug auf den Anker resultiert. Dieser Zug ist stets proportional dem Produkt

$$\text{Magnetismus} \times \text{Stromstärke}. \qquad (1)$$

18. Die Schaltung des Reihenschlussmotors zeigt Fig. 7a, die des Nebenschlussmotors Fig. 7b. Beim Reihenschlussmotor fliesst der Hauptstrom vom Stromabnehmer erst durch den Anker und dann durch die Bewicklung der Pole, so dass die „Erregung“ der Magnete vom Hauptstrom bewirkt wird, also je nach der Grösse dieser stärker oder schwächer ist; beim Nebenschlussmotor wird nur der Anker vom Hauptstrom durchflossen, die Bewicklung der Feldmagnete liegt direkt am Stromabnehmer und an der Fahrschiene, und der „Erregerstrom“ ist daher nur vom „Widerstand“ der Erregerwicklung und der „Spannung“ zwischen Arbeitsleitung und Schiene, nicht aber vom Hauptstrom abhängig.

hierzu auch den Brief von Professor Niethammer, Vorwort S. 16, wo diese Verhältnisse rrtümlich beurteilt werden.

19. Wenn der Anker in Bewegung ist, so entsteht in ihm, gerade wie bei der Dynamomaschine, eine „elektromotorische Kraft“ (abzukürzen E.M.K.), aber so, dass diese Gegen-E.M.K. sich dem Fliessen des Stromes entgegensetzt und bewirkt, dass nur dann Strom fliessen kann, wenn die „Spannung“, die von aussen durch Fahrdraht und Schiene aufgedrückt wird, grösser ist als die Gegen-E.M.K.

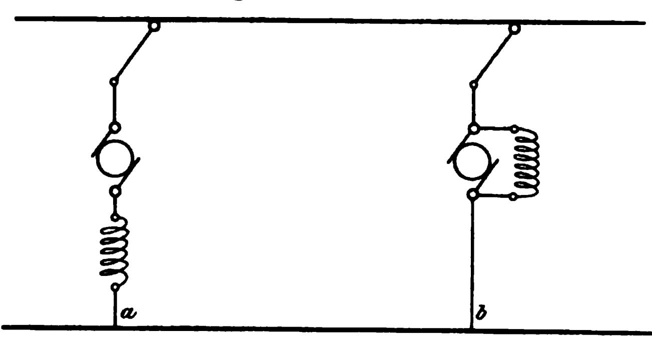


Fig. 7.

20. Die Gegen-E.M.K. ist proportional dem Produkt aus

a) der Umdrehungszahl, bei Reihenschluss- und Nebenschlussmotor, also gleich Null bei der Umdrehungszahl Null, und

b) dem Magnetismus;

sie ist also

α) beim Nebenschlussmotor (konstanter Magnetismus) der Umdrehungszahl direkt proportional;

β) beim Reihenschlussmotor eine Funktion der Umdrehungszahl, die abhängig ist von dem Zusammenhange zwischen erregendem Hauptstrom und erregtem Magnetismus. Diese Funktion wird bestimmt durch die magnetischen Eigenschaften des zum Bau des Motors verwendeten Eisens und lässt sich nicht durch ein einfaches mathematisches Gesetz ausdrücken. Man ermittelt sie daher empirisch und stellt sie durch Kurven dar.

21. Die für das Drehmoment erforderliche Kenntnis von der Stromstärke J lässt sich aus der einfachen Formel gewinnen:

$$J = \frac{P - E}{W}, \qquad (2)$$

wobei P die „Spannung“ zwischen Fahrdraht und Schiene, E die Gegen-E.M.K. und W den Widerstand aller zwischen Fahrdraht und Schiene liegenden, den Hauptstrom führenden Leitungen bedeutet.

22. Aus dem Gesetz für J folgt für $E = O$ ein sehr grosser Wert für J; eine übermässige Stromstärke würde eine unzulässige Beanspruchung des Materials ergeben, da einmal sehr grosse mechanische Kräfte und dann ausserordentliche Erwärmung der Drähte auftreten würden. Die ganze dem Motor zugeführte „Leistung“ müsste ja im

„Widerstand verzehrt“, d. h. in Wärme umgesetzt werden, und diese Wärmeauslösung würde im wesentlichen im Motor und in den Fahrschaltern stattfinden. Man hat daher beim Anfahren vor die Motoren einen Widerstand vorzuschalten, der J herabdrückt. Damit wird an der Notwendigkeit, die ganze Leistung im ersten Augenblick in „Stromwärme“ zu verwandeln, zwar nichts geändert, die Wärmeentwicklung wird aber im wesentlichen in den „Anlasswiderstand“ verlegt, der so gebaut wird, dass er sie aufnehmen kann, und die mechanischen Kräfte werden auf ein zulässiges Mafs herabgedrückt.

23. Die Notwendigkeit, im ersten Augenblick der Anfahrt die gesamte Leistung und dann bis zur Erreichung der geeigneten Umdrehungszahl einen allmählich abnehmenden Betrag derselben zu „vernichten“, bedingt einen neuen Verlust, der, wenn die Arbeitsbilanz der ganzen Fahrt aufgestellt wird, neben dem Bremsverlust zu verbuchen ist. Dieser Verlust wird berechnet nach der Formel:

$$\text{Stromwärme}^{1)} = J^2 W, \tag{3}$$

woraus unter Benutzung von Formel (2) folgt:

$$\text{Stromwärme} = \frac{(P-E)^2}{W}. \tag{4}$$

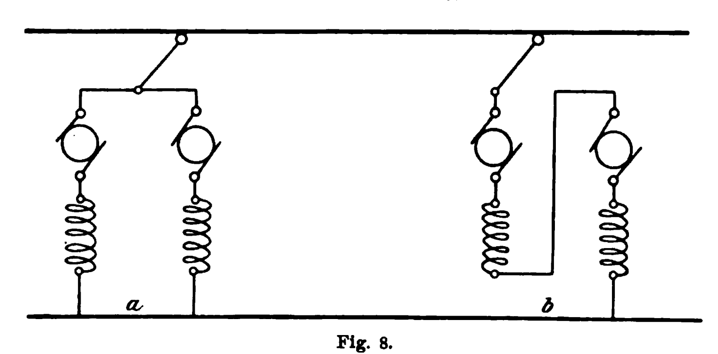


Fig. 8.

Es folgt ohne weiteres, dass man, um den Leistungsverlust zu verringern, danach trachten muss, die Differenz $(P-E)$ so schnell als möglich verschwinden zu lassen oder von vornherein herabzudrücken.

24. Ordnet man auf einem Wagen zwei Motoren, z. B. Reihenschlussmotoren an, so kann man diese entweder nach Fig. 8a „parallel“ oder nach Fig. 8b „hintereinander“ schalten.

Im Falle von 8a bleibt obige Formel ohne weiteres bestehen, im Falle von 8b dagegen wird die

$$\text{Stromwärme} = \frac{\left(\frac{P}{2}-E\right)^2}{W}.$$

[1] d. i. der pro Sekunde im Anlasswiderstand in Wärme umgesetzte Betrag der als elektrische Energie zugeführten Leistung.

Ich habe also schon einen Erfolg in der Verminderung der Differenz zwischen „Spannung“ und „Gegen-E.M.K.“.

25. Da nach (1) die Zugkraft proportional der Stromstärke ist, so habe ich offenbar im Falle 8b die Möglichkeit mit einem Strom J, der die beiden Motoren der Reihe nach durchläuft, eine Gesamtzugkraft herauszubringen, zu der ich im Falle 8a eine doppelt so grosse Stromstärke, nämlich für jeden Motor J, daher im ganzen $2\,J$ entnehmen müsste. Diese Überlegung bestätigt das Resultat von 24, das eine Ersparnis im Falle der Reihenschaltung anzeigte.

26. Die Schaltung 8b würde aber nur die halbe Fahrgeschwindigkeit gestatten, wie die Schaltung 8a, weil schon bei halber Umdrehungszahl

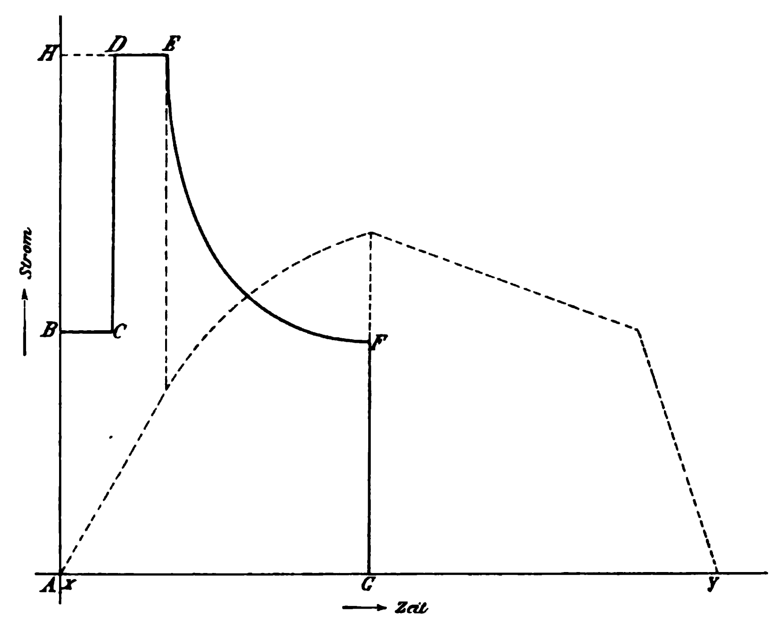


Fig. 9. Fahrt mit Reihenschlussmotoren (Serien-Parallelsystem). $ABCDEFG$ = Arbeitsverbrauch für die Fahrt von x—y.

die beiden in Reihe geschalteten Motoren zusammen so viel Gegen-E.M.K. geben würden, dass der Spannung P „das Gleichgewicht gehalten würde“.

Man fährt daher so an, dass man erst die Motoren in Reihe schaltet und nach Erreichung der halben Geschwindigkeit auf Parallelschaltung übergeht, wonach dann eine doppelt so grosse Stromstärke als vorher zugelassen werden muss, wenn die Zugkraft konstant bleiben soll („Serien-Parallelsystem“).

27. Fig. 9 zeigt ein Schaubild dieser Vorgänge, das der besseren Übersicht wegen in Fig. 6 eingesetzt ist.

28. Bei Gleichstrom ist die zugeführte Leistung oder der Verbrauch eines Motors zu berechnen aus

$$\text{Verbrauch} = \text{Stromstärke} \times \text{Spannung.}$$

Wenn die Spannung zwischen Fahrdraht und Schiene konstant gehalten wird, wie man es bisher bei elektrischen Bahnen ausschliesslich macht, so geben die Ordinaten in Fig. 9 daher gleich ein Maſs des Leistungsverbrauchs.

Aus Leistungsverbrauch und Zeit ergibt sich der Arbeitsverbrauch (im Diagramm die Fläche $ABCDEF$); die Fläche $AHEF$ würde dem Anfahren mit Parallelschaltung von vornherein entsprechen; man sieht sogleich, dass das Serien-Parallelsystem eine gewisse Arbeitsersparnis bedeutet.

29. Was hier für Reihenschlussmotoren gilt, lässt sich auf Nebenschlussmotoren ohne weiteres anwenden, wenn man nicht die Motoren im ganzen, sondern nur die Anker erst hintereinander und dann parallel schaltet.

Würde man auch die Feldwicklungen in dies Verfahren mit einbeziehen, so würde jede Feldwicklung bei Beginn der Anfahrt nur die halbe Spannung erhalten, die Erregerstromstärke würde daher auf die Hälfte des normalen Wertes sinken, mit ihr annähernd auch der Magnetismus und, da hier

$$\text{Zugkraft} = (\text{proportionaler})\ \text{Magnetismus} \times \text{Stromstärke},$$

auch die Zugkraft. Beim Strom J würden also beide Motoren zusammen in Reihe nicht mehr Zugkraft geben, als einer allein. Die Methode wäre wertlos.

Dritter Abschnitt.

30. Wenn man bei einem Nebenschlussmotor die Wicklung des Ankers nicht mit dem äusseren Stromkreis verbindet, sondern in sich schliesst, und mit Hilfe irgend einer geeigneten Einrichtung die Pole um den Anker dreht, so spielt sich ein Vorgang ab, der der Stromerzeugung in einer Wechselstrommaschine entspricht, bei der der Anker still steht und die Pole bewegt werden, nur dass die im Anker erzeugten Ströme nicht in einen äusseren Stromkreis gegeben werden, sondern in der kurzgeschlossenen Ankerwicklung verlaufen.

Lässt man dem Anker freie Beweglichkeit, so zeigt ein Versuch, dass derselbe nicht stehen bleibt, sondern in derjenigen Richtung zu rotieren beginnt, in der die Pole gedreht werden. Die Erklärung dafür liegt darin, dass wieder mechanische Kräfte zwischen dem Magnetismus und den Strömen zur Geltung kommen; wieder gilt die Regel

$$\text{Zugkraft} = \text{Magnetismus} \times \text{Stromstärke} \times \text{Konstante}.$$

31. Die im Anker fliessenden Ströme verdanken ihre Entstehung einer E.M.K., die natürlich auch wieder proportional dem Magnetismus und der relativen Bewegung zwischen Pol und Anker sein muss. Diese Ströme würden verschwinden, wenn die Pole und der Anker gleich schnell umliefen; dann wäre zugleich auch die Zugkraft Null. Wenn man aber durch eine Bremse den Anker zurückhalten würde, so dass zwischen der Umdrehungszahl der Pole und der des Ankers eine kleine Differenz einträte, so würden nun E.M.KK. induziert werden und bei dem geringen Widerstand der Ankerwicklung würden diese relativ starke Ströme zum Fliessen bringen. Die Tourenzahlen werden sich jetzt so einstellen, dass das aus Magnetismus und Stromstärke resultierende Drehmoment dem Drehmoment der Bremse das Gleichgewicht hält. Die mechanische Leistung A_1 bei der Drehung der Pole wird proportional

$$A_1 = \text{Drehzahl der Pole} \times \text{Drehmoment},$$

die am Anker

$$A_2 = \text{Drehzahl des Ankers} \times \text{Drehmoment}.$$

Die Differenz: Drehmoment × Tourenunterschied wäre verloren und, wie man sogleich einsieht, verbraucht durch die von dem zur Erzeugung des Drehmomentes notwendigen Strome veranlasste Stromwärme.

32. Bei gleichbleibendem Drehmoment, aber erhöhtem Widerstand der Ankerwicklung würde dieselbe Ankerstromstärke gebraucht, aber nur mit grösserer E.M.K. erreicht werden können. Der Anker müsste also mehr zurückbleiben; zugleich würden die Stromwärmeverluste wachsen.

33. Bei gleichbleibendem Ankerwiderstand und zunehmendem Drehmoment müsste eine grössere Ankerstromstärke erzeugt, also auch hier eine grössere Differenz der beiden Umdrehungszahlen zugelassen werden.

34. Wird im Sinne von 33 der Versuch gemacht, die Bremsbelastung immer weiter zu treiben, so tritt plötzlich ein Zustand ein, wo der Anker stehen bleibt, nachdem schon vorher die Differenz der Drehzahlen viel schneller zugenommen hatte, als die Bremsbelastung.

Diese Erscheinung hat ihre Ursache darin, dass die im Anker fliessenden Ströme ebensogut wie die die Magnetwicklung umfliessenden Ströme eine Magnetisierung des Motors hervorbringen; der Anker wirkt dabei aber in entgegengesetztem Sinn wie das Polgestell, d. h. der Anker wirkt „entmagnetisierend auf das Feld"; anfänglich, bei geringem Ankerstrom, ist der Einfluss dieser „Rückwirkung" gering, später aber steigt er schnell, bis in dem geschilderten Moment der Magnetismus des Polgestelles „ganz fortgeblasen" wird.

35. Man kann eine Erhöhung der Zugkraft unseres Systems natürlich erreichen, wenn man den von den Polen ausgehenden Magnetismus verstärkt, und findet hier eine Grenze erst dann, wenn das Eisen des Motors „magnetisch gesättigt" ist.

36. Ein Serien-Parallelschalten zweier Rotationseinrichtungen der hier geschilderten Art wäre wertlos, weil es, ähnlich wie es in 29 ausgeführt wurde, eine Schwächung des Magnetismus zur Folge haben würde. Eine solche wäre hier nun sogar doppelt schädlich, denn der Magnetismus hat ja nicht nur das Drehmoment mit den Ankerströmen zu bilden, sondern ist auch ein wichtiger Faktor für die Entstehung der Ankerströme; die durch „Induktion" bei der Drehung der Pole über den Anker hin hervorgerufenen Ankerströme sind dem Magnetismus proportional, und wenn dieser sinkt, so sinken sie mit. Da nun das Drehmoment proportional dem Produkt aus Magnetismus und Ankerstrom ist, so wird es proportional dem Quadrate des Magnetismus abnehmen.

37. Würde erst das Polgehäuse in schnelle Bewegung versetzt und dann der „Erregerstrom" eingeschaltet, so würde der bis dahin stehen gebliebene Anker plötzlich der Bestrahlung des schnell umlaufenden Magnetismus ausgesetzt, es würden grosse E.M.KK.[1]) und demzufolge auch sehr grosse Stromstärken entstehen. Trotzdem würde der Anker nicht anziehen, weil die grossen Ankerströme das Feld „wegblasen", d. h. den aufgedrückten Magnetismus allzusehr schwächen würden. Wollte man grosses Drehmoment erreichen — oder besser gesagt — das grösste mit dem System bei gegebenem Magnetismus mögliche Drehmoment erreichen, so müsste man durch Einschalten eines Anlasswiderstandes in den A n k e r die Anfangsstromstärke so weit abschwächen, dass die entmagnetisierende Wirkung das Drehmoment nicht mehr zerstörte.

38. Aber auch bei sehr hohem Widerstand würde der Anker stehen bleiben, weil im Produkt Magnetismus × Stromstärke dann wieder der zweite Faktor, die Stromstärke, zu schwach bleiben würde. Es gibt also nur einen bestimmten richtigen Wert des Anlasswiderstandes, den man anfänglich einzuschalten und in dem Maſse, wie der Anker anläuft, allmählich zu verringern hat. Dabei wird man, gerade wie bei den früher besprochenen Motoren, die im Anlasswiderstande aufgenommene Leistung als Verlust anzusehen haben.

39. Der Verlust im Anlasser wird um so geringer, je g e r i n g e r d i e S t r o m s t ä r k e beim Anlassen oder (bei gegebenem Drehmoment) je g r ö s s e r d e r M a g n e t i s m u s ist.

40. Wenn Polgehäuse und Anker zugleich in Bewegung kommen, so fällt der Verlust im Anlasser fort.

41. Das von uns betrachtete eigentümliche System ist umkehrbar, d. h. wenn man den „Kurzschlussanker" von aussen antreibt und das Polgehäuse beweglich macht, so lassen sich alle die geschilderten Versuche in analoger Weise wiederholen, mit dem einzigen Unterschied, dass jetzt der Anker voreilt und das Polgehäuse ihm nachläuft. E s g i l t d i e R e g e l, d a s s d e r v o r e i l e n d e T e i l z u g l e i c h d e r t r e i b e n d e i s t.

[1]) Der Doppelbuchstabe KK. bedeutet Pluralis.

Vierter Abschnitt.

42. Aus dem physikalisch interessanten Apparat, der im dritten Abschnitt beschrieben wurde, wird ein für Fahrzeugbetrieb brauchbarer Motor, sobald es gelingt, die Rotation des vom Polgehäuse herrührenden magnetischen Feldes auf andere als mechanische Weise hervorzubringen. Dies geschieht im Drehstrommotor durch Kombination dreier um 120° in der Phase zeitlich gegeneinander verschobener Wechselströme.

43. Eine genaue Erläuterung aller konstruktiven Einzelheiten des Drehstrommotors ist an dieser Stelle ebensowenig möglich, wie es oben bei den Gleichstrommotoren der Fall war, und kann auch leicht entbehrt werden.

Es genügt festzustellen, dass der Motor aus zwei zylindrischen Teilen besteht, von denen der eine fest im Gehäuse liegt und „Lauf“ [1])

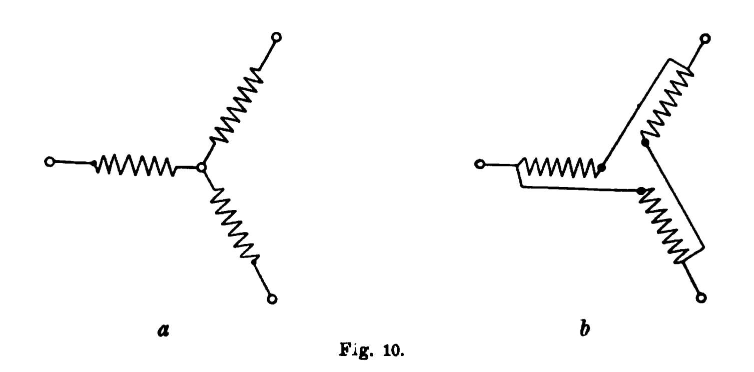


Fig. 10.

genannt werden soll, während der andere, der dem Anker des Gleichstrommotors entspricht, Läufer heisst. Lauf und Läufer tragen in der Regel eine symmetrische Wicklung, die aus drei Abteilungen besteht und entweder im Sinne der Fig. 10a in „Stern“ oder nach Fig. 10b in „Dreieck“ geschaltet ist.

44. Beim Vergleich des Drehstrommotors mit den Gleichstrommotoren ist für Fahrzeugbetrieb folgendes wichtig:

a) Dem Drehstrommotor muss durch drei Leitungen oder durch zwei Leitungen und die Fahrschienen Strom zugeführt werden.

b) Die Stromstärke pro Leitung berechnet sich bei Gleichstrom aus

$$\frac{A}{E} = J_{\text{Gleichstrom}} \qquad \begin{aligned} A &= \text{Verbrauch,} \\ E &= \text{Spannung,} \\ J &= \text{Strom,} \end{aligned} \qquad (3)$$

[1]) Andere Autoren sagen dafür „Ständer“; obiger Name ist in Anlehnung an die Bezeichnung des das Geschoss führenden Teiles der Geschütze entstanden.

bei Drehstrom aus

$$\frac{A}{\sqrt{3}\,E \cos\varphi} = J_{\text{Drehstrom}}, \tag{4}$$

wobei cos φ einen Faktor kleiner als 1 bedeutet, dessen Grösse von den Abmessungen des Motors und seiner Belastung abhängt; diese Zahl heisst der „Leistungsfaktor“, weil sie angibt, um wieviel mehr Stromstärke mit Rücksicht auf die Eigentümlichkeit der Wechselströme dem Drehstrommotor zugeführt werden muss, als gebraucht werden würde, wenn der Leistungsfaktor 1 wäre.

45. Der Leistungsfaktor eines Drehstrommotors wird um so grösser,

a) je kleiner der Luftraum zwischen Lauf und Läufer ist,

b) je geringer bei bestimmter Umfangsgeschwindigkeit die Polzahl eines Motors ist,

c) je grösser die Umfangsgeschwindigkeit ist.

46. Da selbstverständlicherweise ein Motor um so besser ist, je grösser sein Leistungsfaktor ist, so folgt, dass man bemüht sein muss, den Bedingungen zu genügen, die 45 angibt. Für Fahrzeugzwecke kann man die Umfangsgeschwindigkeit nicht beliebig gross wählen, weil sowohl der Raum für die radialen Abmessungen des Motors, als auch die Umdrehungszahl durch ausserhalb des Motors liegende Bedingungen gegeben sind.

Auch die Wahl der Polzahl ist nicht völlig in das Belieben des Konstrukteurs gestellt; zwischen Polzahl und Umdrehungszahl besteht ein zwangsläufiger Zusammenhang, der sich durch das Gesetz ausdrücken lässt: Die natürliche Umdrehungszahl[1]) ist sehr nahe gleich dem Puls n der dem Motor zufliessenden Wechselströme multipliziert mit 60 und dividiert durch die Zahl der Polpaare

$$U = \frac{60\,n}{p}, \tag{5}$$

wobei Puls die Zahl der sekundlichen Perioden bedeutet. Was unter „einer Periode“ zu verstehen ist, zeigt Fig. 11.

Aus Gleichung (5) geht hervor, dass es empfehlenswert ist, um niedrige Polzahl zu bekommen, niedrigen Puls zu wählen.

47. In der Verfolgung der Bedingung 45a hat man sich von mechanischen Rücksichten leiten zu lassen; es haben dabei aber früher gewisse Befürchtungen bestanden, deren Berechtigung durch die Erfahrung gänzlich widerlegt worden ist. Nach dem heutigen Stand der Dinge kann bei Fahrzeugmotoren, die sachgemäss entworfen und ausgeführt sind, ein radialer Luftraum von 1,5 mm bei 400—600 mm Durchmesser des Läufers als durchaus betriebssicher angesehen werden.

---

[1]) d. i. die Umdrehungszahl, auf die sich der Motor von selbst einstellt, wenn keinerlei Regulierwiderstand in seinen Stromkreis eingeschaltet wird.

48. Der Leistungsfaktor ist ausser von den angegebenen Bedingungen abhängig von der Grösse der jeweiligen Stromstärke. Der Zusammenhang zwischen Leistungsfaktor und Stromstärke kann gefunden werden nach einer von Heyland angegebenen graphischen Methode mit Hilfe des sogenannten Kreisdiagramms (Fig. 13).

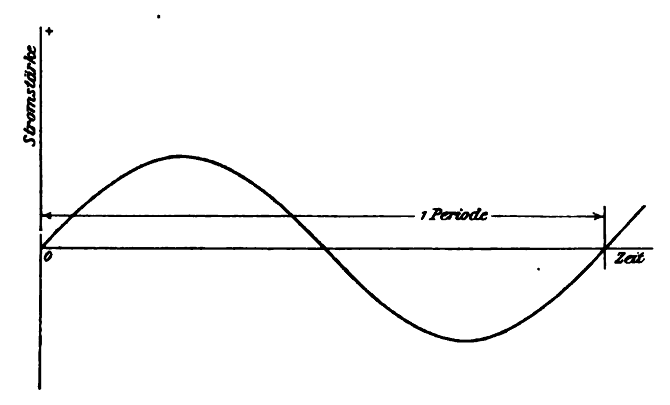


Fig. 11.

49. Aus der Gleichung (4) geht hervor, dass bei gegebener Spannung am Motor ein bestimmter Verbrauch zu jeder Stromstärke gehört; man kann bei konstanter Spannung aus dem Diagramm daher eine Kurve ableiten, die den Leistungsfaktor als Funktion des Verbrauches darstellt (Fig. 12), und findet, dass der Leistungsfaktor einen Höchstwert erreicht, um dann wieder abzunehmen.

Über einen gewissen Wert hinaus lässt sich der Leistungsverbrauch des Motors nicht steigern; auch der Leistungsfaktor überschreitet ein Maximum, um sich dann dem Nullwert schnell zu nähern.

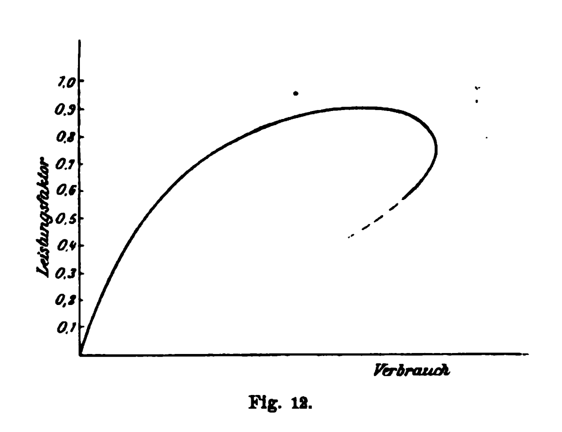


Fig. 12.

50. Aus dem Diagramm kann auch der magnetische Zustand des Motors beurteilt werden. Es ist nämlich bei konstanter Klemmenspannung M der Gesamtmagnetismus im Motor, M_A der von diesem Magnetismus für Bildung des Drehmomentes verwertbare Magnetismus und M_N ein Teil des Magnetismus, den man „Streuung" nennt[1]) (Fig. 13).

[1]) Die Strecken M, M_A und M_N sind als Vektoren aufzufassen.

Nach der Regel, dass die Zugkraft eines Motors proportional dem Produkt aus Magnetismus und Stromstärke im Anker ist, folgt für das Diagramm, dass die Fläche des Dreiecks ABC, und, da die Grundlinie AC zunächst unveränderlich ist, auch dessen Höhe BD dem Drehmoment proportional ist.

51. Aus 50 geht hervor, dass das Drehmoment nur abhängig von Strom, Spannung und Streuung, aber unabhängig von der Umdrehungszahl ist.

Wenn wenige Prozente Ungenauigkeit des Resultates als zulässig angesehen werden, so kann das Diagramm in der Gestalt der Fig. 13 Anwendung finden:

Es bezeichnet dabei J_1 die Stromstärke im primären Teil, J_2 die Stromstärke im sekundären Teil, J_0 die Stromstärke im primären Teil bei Leerlauf, J_k die Stromstärke im primären Teil bei Festbremsung des Motors und Zuführung voller Spannung (Kurzschlussstrom). φ ist der für die Bestimmung des Leistungsfaktors ($\cos\varphi$) massgebende Winkel.

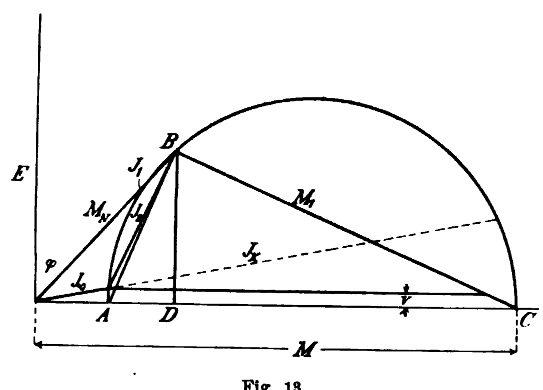


Fig. 13.

52. Aus 50 geht weiter hervor, dass das Drehmoment bei gegebener Spannung ein Maximum hat, das auch bei Zuführung von grösserer Stromstärke nicht überschritten werden kann. Es ergeben sich da ähnliche Verhältnisse, wie sie in 34 beschrieben wurden.

53. Wird die Spannung am Motor erhöht, so steigen J_0 und J_k anfänglich proportional mit der Spannungsänderung; später, wenn das Eisen des Motors anfängt sich magnetisch zu sättigen, steigt J_0 schneller. Fig. 14 zeigt das Kreisdiagramm für Erhöhung der Spannung um 10, 20, 30, 40, 50 und 60%.

Man ersieht, dass dieselbe primäre Stromstärke bei verschiedenen Spannungen verschiedene Leistungsfaktoren verursacht, dass aber auch die Leistung, die der Motor im Maximum aufnehmen kann, steigt.

54. Ebenso wie die Aufnahmefähigkeit des Motors wird durch Erhöhung der Klemmenspannung der grösste Wert des Drehmomentes gesteigert. Fig. 15 zeigt das jeweilig grösste Drehmoment als Funktion der Spannung.

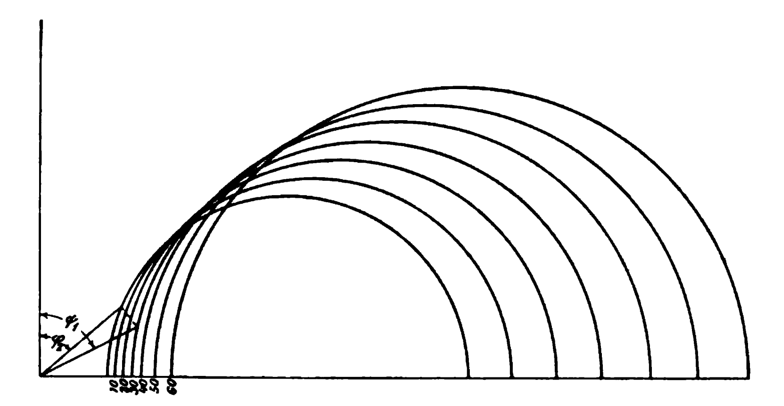


Fig. 14. φ_1 entspricht der normalen Magnetisierung. — φ_2 entspricht der um 30 % erhöhten Magnetisierung.

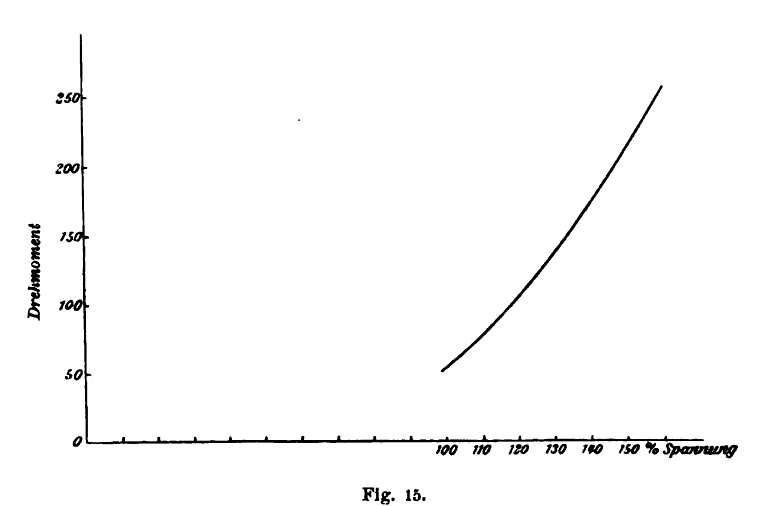


Fig. 15.

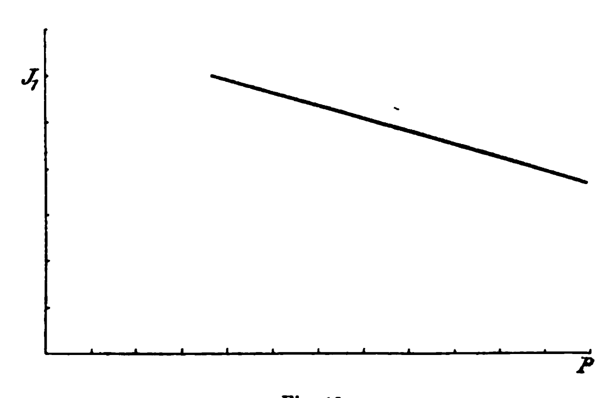


Fig. 16.

55. Dasselbe Drehmoment lässt sich bei erhöhter Spannung unter geringerem Stromaufwand primär, wie sekundär erzielen (Fig. 16) und unter Berücksichtigung der Regel

Drehmoment = konstanter Magnetismus $\times$ Strom

kann man die Erklärung wieder nur darin finden, dass bei erhöhter Klemmenspannung der Magnetismus im Motor gestiegen ist.

56. Es besteht in der Tat ein Zusammenhang zwischen Klemmenspannung und Magnetismus, der sich in folgender Formel ausdrücken lässt:

P = Klemmenspannung,

$P = (J_1 w + kznM 10^{-8})\sqrt{3}$ (für Sternschaltung, siehe 43), (6)

wobei J_1 = Stromstärke primär,

w = Widerstand primär, im normalen Motor sehr klein,

z = Zahl der pro Wicklungsabteilung hintereinander geschalteten Drähte primär,

n = Puls,

M = Magnetismus.

Für Dreieckschaltung ist in der Formel der Faktor $\sqrt{3}$ fortzulassen.

57. Die Formel (6) lehrt, dass dieselbe Erhöhung des Drehmomentes oder dieselbe Verringerung der Stromstärke bei konstantem Drehmoment, die nach 54 durch Erhöhung der Klemmenspannung an den Motoren zu ermöglichen ist, auch herbeigeführt werden kann, wenn man den Magnetismus steigert

a) durch Umschaltung von Sternschaltung auf Dreieckschaltung,
b) durch Verringerung der Zahl der Drähte z,
c) durch Verringerung des Pulses n.

58. Nach 46 war die Umdrehungszahl eines Motors durch den Puls und die Polzahl gegeben, nach 51 folgt, dass zu einem bestimmten Drehmoment eine bestimmte Stromstärke gehört; beide Bedingungen zusammen zeigen, dass der Drehstrommotor bei bestimmter Zugkraftsbelastung bestrebt ist, eine bestimmte mechanische Leistung einzustellen. Für den Fahrzeugbetrieb muss es von grosser Wichtigkeit sein, zu ermitteln, wie der Motor sich in der Zeit verhält, die vergeht, bis diese Leistung erreicht ist, oder mit anderen Worten, bis der Motor auf volle Drehzahl gekommen ist.

59. Die Vorgänge bei der Anfahrt übersieht man am besten, wenn man kurz an das zurückdenkt, was unter 37—40 ausgeführt wurde. Im Momente des Einschaltens besteht zwischen der Umdrehungszahl U_1 des „Drehfeldes“ und der des Läufers U_2 eine grosse Differenz, die „Schlüpfung“ ist gleich U_1. Das sehr schnell über den Läufer eilende Drehfeld würde grosse E.M.KK. und dementsprechend zunächst im Läufer und durch Rückwirkung auch im Lauf die stärksten Ströme erzeugen, die der Motor überhaupt aufnehmen kann (im Diagramm wäre in dem Falle die Stromstärke durch J_k zu messen), das Drehmoment aber wäre fast gleich Null.

Würde man dagegen durch Einschalten von Widerständen in den sekundären Teil das Zustandekommen der übermässigen Ströme verhindern und vielleicht so regulieren, dass gerade der dem maximalen Drehmoment entsprechende Strom fliessen könnte, so würde der Motor schnell anziehen.

In dem Maſse, wie der Läufer sich beschleunigte, würden nun die E.M.KK. auf dem Anker zurückgehen, und ebenso die Ströme, daher würde auch die Zugkraft nachlassen. Man muss dann, weil zu bestimmten Zugkräften bestimmte Stromstärken gehören, den „Anlasswiderstand" allmählich verringern und schliesslich ganz beseitigen, so dass schliesslich nur noch der unvermeidliche kleine Rest von Widerstand bliebe, den die Ankerwicklung selbst verursacht.

60. Das Zurückbleiben des Ankers oder die „Schlüpfung" wird nach Eliminierung des Anlasswiderstandes so gross sein, dass die auf

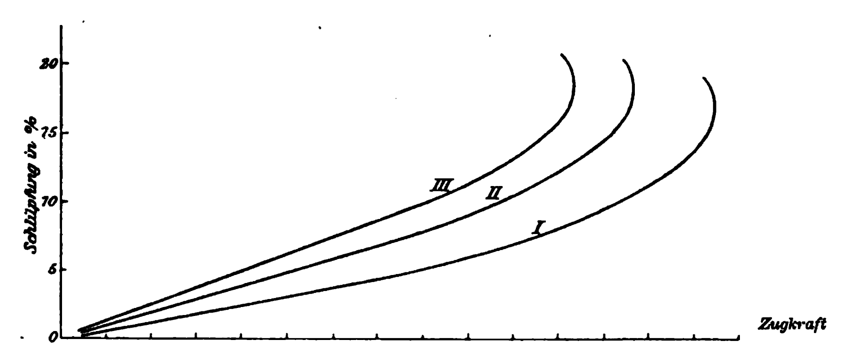


Fig. 17. I Sekundärwiderstand a, II Sekundärwiderstand b, III Sekundärwiderstand c. — $a < b < c$.

den sekundären Teil wirkenden E.M.KK. gerade ausreichen, um den zu dem jeweiligen Drehmoment gehörenden Strom in der Sekundärwicklung fliessen zu lassen. Die Schlüpfung ist also eine Funktion:

a) des im sekundären Stromkreise vorhandenen Widerstandes und
b) der Zugkraft.

Für einen normalen Motor verläuft sie etwa nach den Kurven (Fig. 17).

61. Wird mit bestimmter Zugkraft angefahren, so muss nach 60 während der ganzen Anfahrzeit die Stromstärke konstant gehalten werden; ist die Spannung konstant, so ist daher beim Anfahren der Verbrauch nach Formel

$$\sqrt{3}\, J_1 E_1 \cos \varphi$$

zu berechnen und von dieser zugeführten Leistung wird ein grosser Teil im Anlasswiderstand vernichtet. Die Anfahrt erfolgt in Bezug auf Wirkungsgrad gerade so, wie unter 23 für Gleichstrom abgeleitet wurde.

62. Bei Gleichstrommotoren liess sich der Anfahr-Wirkungsgrad durch das Serien-Parallelsystem verbessern (24), beim Drehstrommotor würde eine Serienschaltung zu denselben Betriebsbedingungen führen, die in 36 geschildert wurden, wäre also zum Anfahren unbrauchbar.

63. Wenn man eine Umschaltung in umgekehrtem Sinne vornähme, d. h. wenn man mit Parallelschaltung anführe und für die freie Fahrt auf Reihenschaltung überginge, so würde anfänglich jeder Motor doppelt so viel Magnetismus machen, als bei freier Fahrt, der Zug würde also mit pro Motor verringerter Stromstärke anlaufen können; nach Erreichung der vollen Geschwindigkeit würde dann durch die Reihenschaltung die Leistungsfähigkeit der Motoren verringert und so bewirkt werden, dass man trotz der grossen Verschiedenheit der Motorleistungen während der Beschleunigung und während der freien Fahrt mit annähernd gleich gutem Wirkungsgrad der Motoren arbeiten könnte; aber der grosse Stromwärmeverlust im Anlasser bliebe natürlich bestehen.

Eine solche Anordnung würde also keinen wesentlich besseren Anfahrwirkungsgrad und fast ebenso grossen Verbrauch am Schluss der Anfahrt bei Erreichung der Meistgeschwindigkeit ergeben als vorher die einfache Parallelschaltung; sie würde auch einen ziemlich komplizierten Fahrschalter bedingen und ist wohl aus diesen Gründen bisher nicht praktisch angewendet worden.

64. Sehr ähnliches, was für Reihenschlussmotoren in Bezug auf die Massenladung gilt, lässt sich mit einer Anordnung erreichen, bei der entweder noch während der Beschleunigungsperiode in der in 63 geschilderten Weise umgeschaltet wird oder ebenfalls während der Beschleunigungsperiode mit Dreieckschaltung angefahren und sodann auf Stern umgeschaltet wird. Das Fahrdiagramm wird dabei ähnlich aussehen, wie Fig. 18a u. b, der Fahrschalter würde allerdings mindestens ebenso verwickelt als beim Serien-Parallelsystem mit Gleichstrom.[1])

Der Nutzen dieses Verfahrens würde darin liegen, dass man, ebenso wie es beim Reihenschlussmotor der Fall ist, mit verhältnismässig sehr grosser Zugkraft anfahren und so grosse Anfangsbeschleunigung erzielen kann; die Leistungsaufnahme im ersten Moment ist dann allerdings eine vergrösserte — im Gegensatz zum Serien-Parallelsystem bei Gleichstrom — aber die Motoren werden in Bezug auf Stromwärme nicht mehr beansprucht, als bei der normalen Beschleunigung bei Sternschaltung, weil die vergrösserte Stromstärke von zwei Zweigen der Wicklung aufgenommen wird (vergl. Fig. 10).

Wenn man nun mit grösserer Anfangsbeschleunigung anfährt, so gewinnt man an Anfahrzeit und vermindert folglich etwas den Anfahrverlust. Oder man kann, wenn man nur einen Teil des Gewinnes ausnutzen will, nach Eintritt einer gewissen Geschwindigkeit die Be-

[1]) Vergl. den Brief von Oberingenieur Ziehl, Vorwort S. 17.

schleunigung durch Umschalten so weit herabsetzen, dass nun die Leistungsaufnahme nur noch eine geringe bleibt.

Fig. 18a zeigt den Fall, dass nach 20 Sekunden, Fig. 18b den, dass nach 18 Sekunden umgeschaltet wird;[1]) der Arbeitsverbrauch ist,

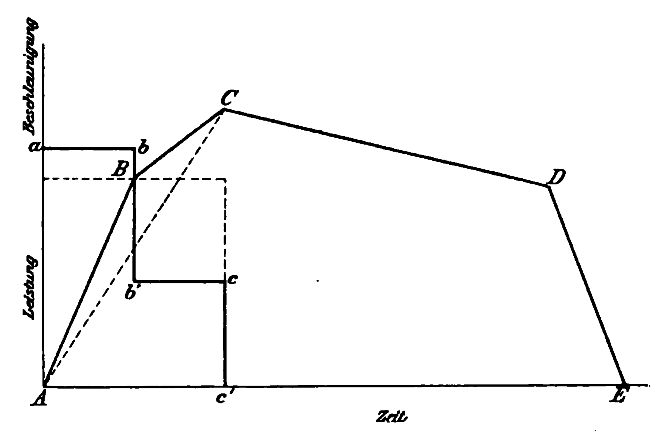


Fig. 18a. *ABCDE* = Fahrt beginnend mit Dreieckschaltung übergehend zu Sternschaltung, Auslauf, Bremsung. — *Aabb'cc'* = Leistungsverbrauch bei obiger Fahrt. — *AC* = Beschleunigung für den Fall, dass nicht umgesteuert wird.

wie das Diagramm zeigt, in beiden Fällen wesentlich verschieden (eine gleiche Abhängigkeit von der Pünktlichkeit des Motormannes lässt sich übrigens für das Serien-Parallelsystem beim Reihenschlussmotor nach-

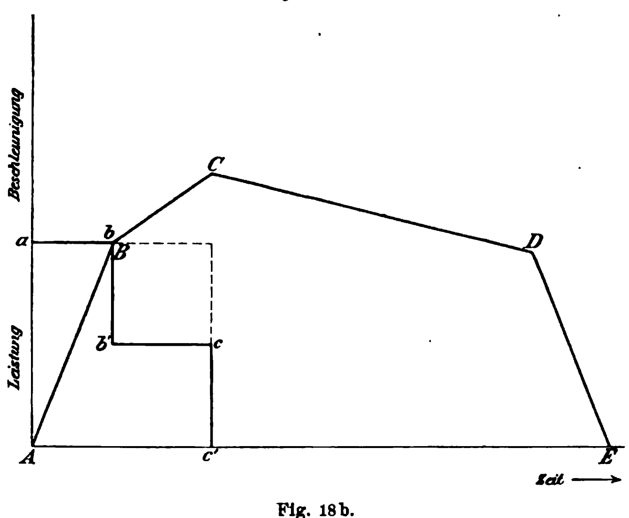


Fig. 18b.

weisen), aber kleiner, als wenn während der ganzen Anfahrzeit mit konstanter Beschleunigung in gleicher Zeit auf gleiche Geschwindigkeit angefahren würde; für diesen Fall würden in Fig. 18 die punktierten Linien die Verhältnisse darstellen. In diesem letzteren Falle müsste auch,

[1]) Bei zugleich verschieden regulierter Beschleunigung.

wie man sieht, der Motor etwas grösser sein, da er bei normaler, weil unverändert bleibender Schaltung grosse Zugkraft zu entwickeln hätte.

65. Wollte man in Bezug auf die Motorenzahl weiter unabhängig bleiben und gleichzeitig Komplikationen am Fahrschalter möglichst vermeiden, so könnte man zwei andere Methoden in Vorschlag bringen.[1])

Die erste dieser Methoden würde in der Anwendung von einem oder mehreren Drehstrommotoren mit veränderlicher Polzahl bestehen. Solche Motoren sind schon mehrfach mit Erfolg gebaut worden;[2]) ganz neuerdings hat die Maschinenfabrik Örlikon eine sehr verbesserte Ausführung auf den Markt gebracht, über die in der Schweizerischen Bauzeitung Bd. XI, Heft 16 von Dr. Behn-Eschenburg einige nähere Angaben und Messungsresultate veröffentlicht wurden, die ich der Wichtigkeit der Sache wegen hier anführen möchte.

66. Motor mit veränderlicher Umdrehungszahl der Maschinenfabrik Örlikon:

Läuferdurchmesser . $D = 240$ mm,[3])
Läuferbreite axial . $B = 180$ „
Gewicht . . . . . 220 kg,
Normalleistung . . . 8 PS.

Polzahl			12	8	6	4
Spannung			190	190	190	190
Umdrehungen im Leerlauf			500	750	1000	1500
Leistung normal			3,5	4	7	8
Drehmoment normal			5,5	4,1	7	8
„ maximal			9,5	6,2	18	12
Wirkungsgrad	1/1	normaler Last	72 %	73 %	85 %	86 %
„	1/2	„ „	70 %	72 %	82 %	86 %
Leistungsfaktor	1/1	„ „	0,7	0,82	0,85	0,92
„	1/2	„ „	0,5	0,65	0,70	0,83
Schlüpfung	1/1	„ „	10 %	7 %	3 %	4 %
Leerlaufstrom			11	9	8,5	6
Anlaufstrom			50	50	130	135
Anlaufszugkraft			5,5	3,5	6	5
Erwärmung nach 3 Stunden			50°	50°	40°	40°

67. Der Motor hatte einen Kurzschlussanker mit sogenannter Käfigwicklung nach der in Fig. 19 dargestellten Art; ein solcher Anker kann in Bezug auf Einfachheit des Aufbaus wohl kaum mehr übertroffen werden.

Trotzdem nun bei dieser Anordnung Widerstände für den Anlauf nicht eingeschaltet werden können, zieht der Motor beim Einschalten unter voller Last und bei grösster Polzahl an. Man erhält nämlich bei 12 Polen nur den dritten Teil der Drehzahl des Drehfeldes und daher

[1]) Ähnliche Vorschläge finden sich in der Beschreibung der Drehstromstrassenbahn Lugano von Brown, Bovéri & Co. Elektrotechnische Zeitschrift 1896.

[2]) Z. B. von Dalander, Ziehl, Heyland u. a.

[3]) Diese Abmessungen überschreiten die der normalen Motoren ohne Pol-Umschaltevorrichtung nicht.

auch nur den dritten Teil der E.M.KK. in der Ankerwicklung. Den Widerstand der Sekundärwicklung kann man dabei leicht so wählen, dass mit dem Drittel der E.M.KK. keine übermässigen Stromstärken entstehen. Die Anfahrt erfolgt daher einfach so, dass man primär erst auf 12, dann auf 8, dann auf 6 und schliesslich auf 4 Pole umschaltet. Man bedarf eines Anlasswiderstandes nicht und der Wirkungsgrad der Anfahrt wird ein sehr grosser.

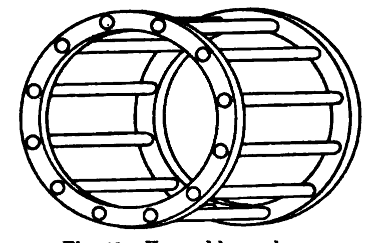


Fig. 19. Kurzschlussanker.

Das entsprechende Fahrdiagramm zeigt Fig. 20.

Es ist zweifellos, dass dieser Anordnung für Fahrzeugzwecke und ähnliche Aufgaben eine ganz hervorragende Bedeutung verschafft werden kann.

68. Die zweite Methode, um ein wirtschaftliches Anfahren ohne Komplikation zu erreichen, wäre die, dass man mit erniedrigtem Puls

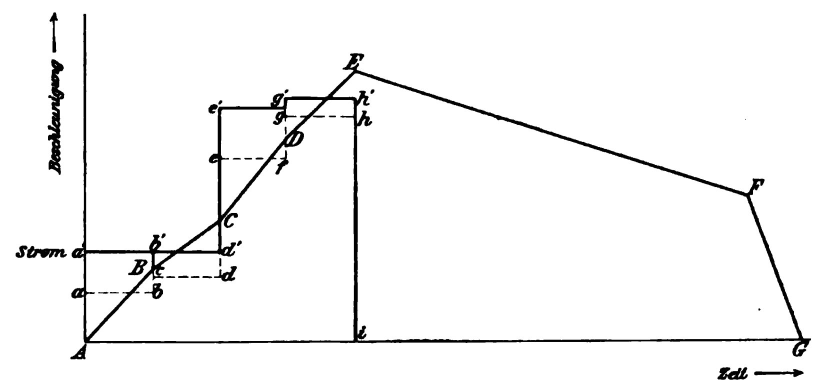


Fig. 20. $ABCDEFG$ = Fahrdiagramm. — $Aabcdefghi$ = Arbeitsverbrauch. — $Aa'b'd'e'g'h'i$ = Scheinbarer Arbeitsverbrauch (Arbeitsverbrauch dividiert durch den Leistungsfaktor).

anführe und dann auf normalen Puls überginge. Dies würde allerdings eine besondere Einrichtung der Arbeitsleitung zur Voraussetzung haben. Man hätte im Krafthaus zweierlei Puls zu erzeugen und die Kontakt-

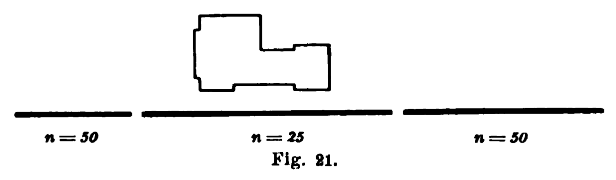


Fig. 21.

leitung in Abschnitte zu teilen. In der Station (Fig. 21) müsste der eine Abschnitt liegen, der mit niedrigem Puls zu speisen wäre, und auf der Strecke der andere Abschnitt mit hohem Puls. Die Längen der betreffenden Strecken wären so zu bemessen, dass der Zug die

Strecke mit hohem Puls dann erreichte, wenn der erste Teil der Anfahrt beendigt wäre. Man hätte

a) Anfahrt. Niedriger Puls, grosser Magnetismus, grosse Zugkraft bei normalem Strom und normaler Spannung, also geringe Leistungsaufnahme, mässiger Stromwärmeverlust.

b) Zweiter Teil der Anfahrt. Hoher Puls, geringerer Magnetismus, abgeschwächte Beschleunigung, geringere Zugkraft, also ebenfalls keine übermässige Leistungsaufnahme.

69. Die Methode aus 68 hat den Vorzug, dass sie die Umschaltung von niedriger auf hohe Geschwindigkeit automatisch vornehmen würde, wobei dem Motormann lediglich die Aufgabe zufiele, mit Hilfe des Anlass-

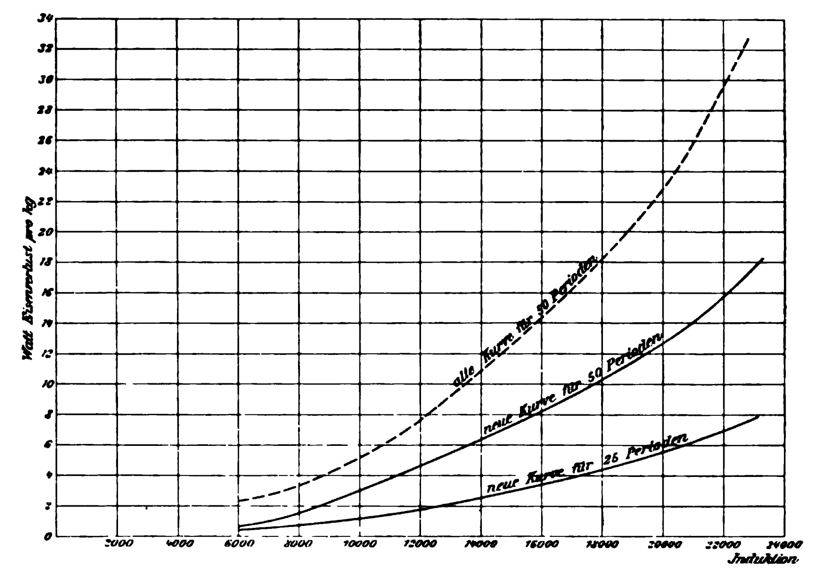


Fig. 22. Eisenverluste.

widerstandes die Stromstärke konstant zu halten. Sie liesse sich natürlich auch mit der Methode aus 67 kombinieren.

70. Ein anderer Vorzug der Methode aus 68 ergibt sich aus einem bisher noch nicht besprochenen Umstand. Wird Eisen einer wechselnden Magnetisierung unterworfen, so entstehen im Eisen selbst Leistungsverluste, die eine Erwärmung des Eisenkörpers zur Folge haben. Es ist an dieser Stelle ganz gleichgültig, wie das Zustandekommen dieser „Eisenwärme“ zu erklären ist, es genügt, ihre Grösse zu kennen. Diese ist abzulesen aus der Kurve Fig. 22.[1])

[1]) Diese Kurven sind nach Mitteilungen der Bismarckhütte und der E. A.-G. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M., gezeichnet; sie zeigen den bedeutenden Fortschritt, den man in jüngster Zeit in der Herstellung der Dynamobleche erreicht hat, und lassen erkennen, dass manches, was für Motoren älteren Jahrganges bezügl. der „Eisenwärme“ richtig ist, gegenwärtig nicht mehr zutrifft.

Für zunehmende magnetische Beanspruchung[1]) des Materials durch „grössere Kraftliniendichte“ steigt der Verlust pro Kilogramm Eisengewicht schnell, ebenso für zunehmenden Puls. Fährt man also bei bestimmter Kraftliniendichte mit niedrigerem Puls an, so erhält man geringere „Kernverluste“ und geringere Erwärmung des Eisens, als wenn man mit vollem Puls anlaufen liesse.

71. Es gibt endlich noch eine weitere Methode, um die Wirtschaftlichkeit des Anfahrens zu erhöhen, die hier der Vollständigkeit halber Erwähnung finden soll: die Methode der „Tandemschaltung“ oder „Kaskadenschaltung“ der Motoren.

Führt man zwei Drehstrommotoren so aus, dass sowohl Lauf als auch Läufer eine in drei Abteilungen hergestellte „Dreiphasenwicklung“ erhalten, so kann man sie nach Fig. 23 schalten.

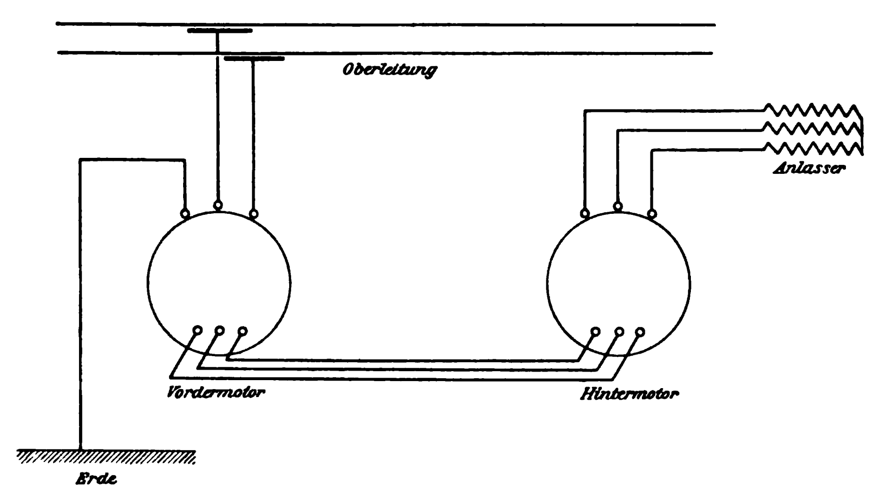


Fig. 23. Kaskadenschaltung.

Es gilt dann folgende Rechnung.[2]) Ist die Schlüpfung des ersten Motors s_1, so ist die Umdrehungszahl des am Netz liegenden „Vordermotors“

$$n_1 = \frac{60\, n_1}{p}(1 - s_1)$$

und es entstehen infolge der Schlüpfung auf dem sekundären Teil Wechselströme mit dem Puls

$$n_2 = n_1 (1 - s_1),$$

die dem primären Teil des zweiten Motors, des „Hintermotors“, zugeführt werden, so dass dessen Umdrehungszahl bei der Schlüpfung s_2

$$U_2 = \frac{60\, n_2\, s}{p} = \frac{60}{p} n_1 (1 - s_1)\, s_2 = \frac{60}{p} n_1 (s_1 - s_1 s_2).$$

---

[1]) Gemessen durch die „Kraftliniendichte“ oder „magnetische Induktion“.

[2]) Vergl. Dubois und Blondel, la traction électrique.

Da nun $s_1 s_2$ gegenüber s_1, das an sich einen sehr kleinen Wert (etwa 0,04 oder dergl.) hat, verschwindet und da U_1 bei Antrieb derselben Achse durch beide Motoren oder bei äquivalenter Anordnung gleich U_2, so folgt angenähert

$$(1 - s_1) = s_1$$

oder

$$2\,s_1 = 1\,s_1 = \frac{1}{2}$$

und

$$U_1 = U_2 = \frac{1}{2}\,\frac{60\,n_1}{p}.$$

Die Motoren laufen bei gleicher Polzahl also in Kaskadenschaltung mit halber Umdrehungszahl.

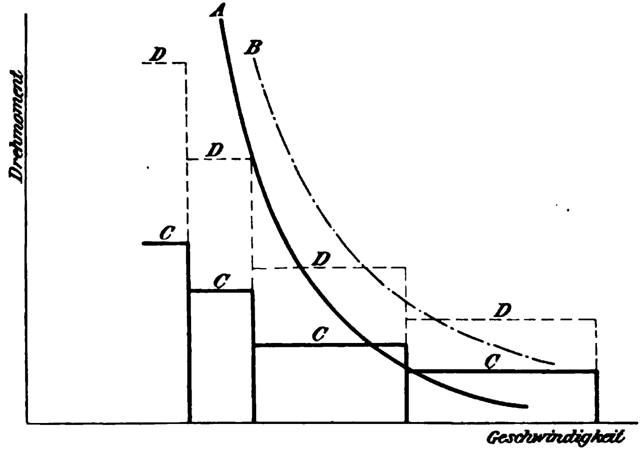


Fig. 24.

72. Auf die Kaskadenschaltung kann man folglich eine ähnliche Anfahrmethode gründen, wie auf die Regulierbarkeit der Umdrehungszahl eines Motors durch Veränderung der Polzahl. Man bekommt aber wieder einen etwas weniger einfachen Fahrschalter.

73. Die Tandemschaltung ist von Danielson auch auf die Kombination von Motoren mit verschiedenen Polzahlen angewendet worden. Er kann dadurch erreichen, dass sich vier verschiedene Umdrehungszahlen (Fig. 24) einstellen lassen; aber auch diese Einrichtung ist natürlich in den praktischen Ausführungen mit einigen Komplikationen verknüpft.

74. Bei jeder Kaskadenschaltung verschlechtern sich der Leistungsfaktor und der Wirkungsgrad des Systemes; hat man daher Anordnungen, die die Vorteile der Tandemschaltung ohne deren Nachteile erreichen lassen (wie die Methoden in 67 u. 68), so wird man diese bevorzugen.

Fünfter Abschnitt.

75. Aus dem vierten Abschnitt ist zu ersehen, dass der Drehstrommotor leicht und ebensogut als Gleichstrommotoren Einrichtungen erhalten kann, die eine Einschränkung der bei gewöhnlicher Anfahrt im Anlasser auftretenden Energieverluste ermöglichen und einen Anfahrtwirkungsgrad erreichen lassen, der dem der Gleichstrommotoren mindestens nicht nachsteht. Diese Einrichtungen schliessen die Möglichkeit einer vorübergehenden Regulierung der Fahrgeschwindigkeit, die übrigens für Vollbahnen meist nur untergeordnete Bedeutung hat, ein. Vergl. hierzu 126—128.

76. Mit der Beseitigung des grössten Teiles der rein elektrischen Verluste ist aber noch nicht die Beseitigung der mechanischen Verluste durch die „Ladung der Massen" erreicht. Eine solche ist ohne besondere Vorrichtungen nur bis zu gewissem Grade durch eine Einrichtung der Fahrt nach Massgabe von 10 zu erreichen, indem man auf der freien Fahrt eine allmähliche Entladung durch Auslaufenlassen des Zuges vornimmt.

77. Ein Wiedergewinn eines grösseren Teiles der Massenladung sollte auf den ersten Blick möglich sein, wenn man die Motoren auf der Bremsstrecke in ihrer Wirkung umgekehrt, d. h. als Dynamos auf das Netz arbeiten liesse. Diese theoretisch bestehende Möglichkeit ist praktisch bei Gleichstromreihenschlussmotoren ausgeschlossen und bei Gleichstromnebenschlussmotoren mit den Vorteil aufhebenden Nachteilen konstruktiver Art verbunden und wird deshalb nur ganz ausnahmsweise[1]) — z. B. bei längerer Talfahrt — für zweckmässig befunden und auch dann nur mit Zögern vom Konstrukteur angewendet; dabei spricht mit, dass der Nebenschlussmotor im Eisenbahnbetrieb überhaupt zu Bedenken Veranlassung gibt.

78. Drehstrommotoren gestatten in sehr einfacher und absolut betriebssicherer Weise eine Energierückgabe an das Netz; wird nämlich der Läufer in irgend einer Weise durch äussere Kräfte so angetrieben, dass

$$U > \frac{60\,n}{p},$$

so entsteht eine Wirkung, ähnlich der in 41 angedeuteten, die Stromrichtung im primären Teil kehrt sich um und der Motor arbeitet automatisch als Stromerzeuger. Hiervon wird bei bestehenden Bahnen in reichem Maſse und mit gutem Erfolg in der Praxis Gebrauch gemacht

a) bei der Talfahrt der Züge ohne jeden äusseren Eingriff seitens des Motormannes (Brown, Bovéri & Co., 1896),

[1]) Barmer Bergbahn; Akkumulatorenlokomotive der A. E.-G. u. s. w.

b) beim Anhalten durch Umschalten je zweier Motoren von Parallelschaltung auf Tandemschaltung (Ganz & Co., 1899).

Noch nicht praktisch ausgenützt sind die Möglichkeiten,

c) beim Anhalten die Polzahlen der Motoren nach 67 successive umzuschalten,

d) beim Anhalten die Züge auf eine Strecke mit erniedrigtem Puls auflaufen zu lassen (Kübler-Schimpff, 1897).[1])

79. Der sich rechnerisch ergebende direkte Gewinn aller dieser Methoden wird in den einzelnen Fällen verschieden ausfallen und kann gewiss bis zu 50 % der sonstigen Bremsverluste betragen.

Von grösserer Wichtigkeit dürfte der indirekte Gewinn sein, der — bei kurzen Stationsentfernungen und grossen Reisegeschwindigkeiten und nur bei diesen kommt neben den Bergbahnen der Nachteil der Bremsverluste beim Anhalten ernstlich in Frage — darin besteht, dass eine bestimmte Strecke in bestimmter Zeit ohne sehr hohe Meistgeschwindigkeit und bei mässiger Beschleunigung und ohne Verzögerung durch Entladen der Massen beim Auslaufen doch mit gutem Wirkungsgrad durchfahren werden kann. Fallen dann die grossen Kräfte bei der Anfangsbeschleunigung fort, so wird die Konstruktion aller motorischen Teile und der Wagen überhaupt wesentlich leichter gehalten, die Wirtschaftlichkeit der Fahrt also noch weiter erhöht werden können (vergl. hierzu noch einmal 15).

80. Das selbsttätige Zurückarbeiten bei erhöhter Drehzahl (Übersynchronismus) findet in der Praxis an anderer Stelle eine interessante Anwendung, die sich sinngemäss auf Eisenbahnbetriebe übertragen lässt.

Beim Antrieb schwerer Zentrifugen pflegt — bei ungeschicktem oder notwendigerweise sehr schnell erfolgendem Anfahren — die starke Belastung der Primärmaschine ein momentanes leichtes Zurückbleiben der Antriebsmaschinen zu verursachen. In demselben Augenblick laufen

---

[1]) Im Projekt der Genannten für die Umwandlung der Wannseebahn für elektrischen Betrieb heisst es:

„Dort, wo jedesmal mit dem Bremsen begonnen werden muss, hört die eigentliche Speiseleitung auf und es beginnt die Strecke mit niedrigem Puls. Die Motoren, die an dieser Stelle eine Umdrehungszahl haben, die dem höheren Puls entspricht, werden nun plötzlich mit einem Netz von niedrigerem Puls verbunden und arbeiten infolgedessen mit erheblichem „Übersynchronismus“. Es ist eine Eigentümlichkeit der Induktionsmotoren, dass sie unter diesen Umständen als Generatoren wirken, d. h. anstatt Energie zu verzehren, solche abgeben und dabei ein ihrem Drehungssinn entgegengesetztes Drehmoment entwickeln. Werden die Verhältnisse richtig gewählt, so ist die Energieabgabe bei grossem Übersynchronismus klein, nimmt dann allmählich zu und erreicht unmittelbar vor dem neuen Synchronismus ihr Maximum. Bei der Bahnanlage ergibt sich demnach beim Eintritt in die Strecke mit niedriger Periodenzahl eine allmähliche und ohne Ruck einsetzende, sich nach und nach steigernde Bremswirkung, die so lange andauert, bis der Zug auf den entsprechenden Teil seiner Geschwindigkeit heruntergekommen ist.“

die schon im Betrieb befindlichen Zentrifugen mit Übersynchronismus und geben aus ihrer Massenladung, wie indirekte Schwungräder, Leistung an die anlaufende Zentrifuge ab.

In gleicher Weise kann bei Drehstromeisenbahnbetrieb ein Hin- und Hergeben von Leistung zwischen anfahrenden und haltenden, bergwärts und talwärts fahrenden Zügen stattfinden.

Sechster Abschnitt.

81. Bisher können wir als Vorzug der Drehstrommotoren gegenüber den Gleichstrommotoren also notieren:

a) Drehstrommotoren gestatten eine Verringerung der Bremsverluste. (Fünfter Abschnitt.)

b) Drehstrommotoren gestatten Einrichtungen, die den Erfolg und die Sicherheit des Betriebes in geringerem Mafse von der Aufmerksamkeit des Motormannes abhängig machen, als bei Gleichstrombetrieb. (68, 78a u. d.)

c) Drehstromwagen können bei stadtbahnartigem Betriebe (kurze Stationsentfernung) im ganzen leichter gebaut werden als Gleichstromwagen. (79.)

82. Es kommt nun hinzu, dass Gleichstrommotoren und auch die neuerdings von amerikanischer Seite für Eisenbahnbetrieb vorgeschlagenen Reihenschluss-Wechselstrommotoren einen sogenannten Kommutator erhalten müssen, der beim Drehstrommotor in Fortfall kommt.

Wenn nun auch der Bau von Kommutatoren, insbesondere auch durch amerikanische Fabriken, bis zu einer Vollkommenheit entwickelt worden ist, die bei den gegebenen ungünstigsten Konstruktionsbedingungen ein glänzendes Zeugnis für Fleiss und Geschicklichkeit von Konstrukteur und Werkstatt ablegt, so ist und bleibt der Kommutator eine Schwäche des Gleichstrommotors. Interessant ist der Ausspruch eines erfahrenen amerikanischen Praktikers:[1])

„Even after the advent of the carbon brush the commutator and brush holder remain one of the most difficult parts of railway motor construction“.

83. Der Kommutator bedingt die Einhaltung einer bestimmten „Spannungsgrenze“, die für normale Motoren sicher nicht über 1000 Volt

[1]) Modern Electric Railway Motors by George P. Hauchelt, S. B. Member of the Amerikan Institute of Electrical Engineers. New York, Street Railway Publishing Company, 1901. (Ein sehr lesenswertes Buch für Praktiker.)

liegt. Der Fortfall des Kommutators gestattet nach bis jetzt vorliegenden Erfahrungen, die Drehstrommotoren bis zu 10000 Volt zu bauen, und diese Grenze wird sich im Laufe der Jahre noch weiter hinausschieben lassen.

84. Motoren, die keinen Kommutator haben, laufen natürlich unter allen Umständen funkenfrei; sie haben weiter den Vorteil, dass sie nur teilweis gekapselt zu werden brauchen und daher im elektrischen Sinne eine viel bessere Materialausnutzung ermöglichen, auch, was beim stadtbahnartigen Betriebe wertvoll ist, geringere Trägheit des Ankers bekommen können.

85. Über den Vorteil der hohen Spannung braucht nicht mehr gesprochen zu werden; Näheres darüber findet sich im Vorwort auf S. 6.

86. Bei Berücksichtigung der angeführten Stelle aus dem Vorwort fügen wir jetzt zu den in 81 angeführten Vorteilen den neuen und wichtigsten hinzu:

Drehstromeisenbahnen werden bei gleichen Leistungsfähigkeiten ungleich billiger in Anlage und Betrieb, als Gleichstrombahnen, weil sie gestatten, überall direkt mit Hochspannung zu arbeiten; es liegt kein Grund vor, die Stadtbahnen hiervon auszunehmen.

Da letzteres heftig bestritten wird, müssen wir diese Frage an der Hand der Einwendungen noch näher studieren.

Siebenter Abschnitt.

87. Die Frage, ob Drehstrom oder Gleichstrom auf der Eisenbahn empfehlenswerter sei, ist in der Gegenwart wieder mehr in Fluss gekommen, einmal durch den wirtschaftlichen Misserfolg des von der preussischen Staatsbahnverwaltung unternommenen „Versuches“ des elektrischen Betriebs auf der Wannseebahn mit Gleichstrom nach dem System Bork, dann durch das sehr günstige Angebot der Firma Ganz & Co. für die Ausrüstung einer Untergrundbahnlinie in London mit Drehstrom und endlich durch die Schnellbahnversuche. Es ist daher erklärlich, dass von verschiedenen Seiten eine Prüfung der Vor- und Nachteile der beiden Betriebsarten vorgenommen wurde, und unter diesen Prüfungen ist es, soweit Veröffentlichungen in Frage kommen, vor allem die Arbeit von E. J. Berg, Street Railway, Journal 1901, S. 210 ff., die eine besondere Beachtung gefunden hat.

88. Berg unternimmt in seinem Aufsatz zunächst einen allgemeinen Vergleich der verschiedenen Motorarten und hebt hervor, dass es bei Drehstrom nur jeweilig eine Geschwindigkeit gebe, bei der sich guter Wirkungsgrad erzielen lasse. Dies ist ein Irrtum, wie 66 und 67 zeigen.

89. Berg hebt weiter hervor, dass Drehstrom-Induktionsmotoren infolge der Tatsache, dass der Leistungsfaktor stets geringer sei als eins, scheinbar mehr Kilowatt oder besser mehr scheinbare Kilowatt (Produkt aus Strom und Spannung) aufnehmen, als Gleichstrommotoren. Das ist richtig, aber bedeutungslos, weil für die Wirtschaftlichkeit der Zuleitung der elektrischen Energie nicht das Produkt Strom × Spannung, sondern allein die Stromstärke massgebend ist. Da Drehstrommotoren bedeutend höhere Spannungen zulassen, als Gleichstrommotoren, so kann bei ersteren trotz des Leistungsfaktors unter allen Umständen ein besserer Wirkungsgrad für die Zuleitung erreicht werden.

90. Trotzdem ist man, wie Berg richtig angibt, bestrebt, durch möglichst geringe Bemessung des radialen Luftraumes einen guten Leistungsfaktor zu erreichen (siehe 45); wenn aber hieraus von ihm geschlossen wird, dass man deswegen wesentlich schwierigere Montage und erhöhte Reparaturkosten bekäme, so ist das eine Ansicht, die mit der Erfahrung nicht übereinstimmt. Auf der Burgdorf-Thun-Bahn, die seit 3 Jahren im Betriebe ist und mit Drehstrommotoren arbeitet, deren Luftraum radial nur 1,5 mm ausmacht, ist nach Mitteilung der Depotverwaltung bis heute noch nicht eine Motorreparatur vorgekommen![1])

91. Berg setzt voraus, dass es nicht möglich sei, Eisenbahndrehstrommotoren für höhere Klemmenspannung als 3000 Volt zu bauen. Dem widerspricht die Tatsache, dass Siemens & Halske eine Lokomotive mit Motoren für 10000 Volt Klemmenspannung im Betrieb haben.[2])

92. Aus dem Vorhandensein des Leistungsfaktors schliesst Berg darauf, dass die durch die Widerstände der Motorwicklung verursachten Verluste beim Drehstrommotor grösser sein müssten, als beim Gleichstromreihenschlussmotor.

Nach mir vorliegenden Angaben ergibt sich für einige Motoren folgendes:

	Gewicht kg·	PS	J_1	J_2	Widerstand Ohm	Stromwärme Watt	$^0/_0$ der Leistung
Amerikan. Gleichstrommotor . .	1080	41	73	—	0,666	3660	12,0
Amerikan. Gleichstrommotor . .	1720	80	140	—	0,175	3440	5,8
Drehstrommotor d. Burgdorf-Thun-Bahn (Brown, Bovéri & Co.)	1500	60	27[3])	410	primär 3×0,58 sekundär 3×0,012	1280 600 } 1880	4,3

[1]) Übrigens haben auch Gleichstrombahnen seit längerer Zeit Motoren mit sehr geringem Luftraum in Betrieb.

[2]) Die Veröffentlichung der 10000-Volt-Lokomotive ist allerdings erst nach Erscheinen des Berg'schen Aufsatzes erfolgt.

[3]) pro Draht. Der Lauf hat Dreieckschaltung. Die Stromstärke berücksichtigt den Wirkungsgrad einschl. Vorgelege.

Danach zeigt sich auch in diesem Punkte das etwas allgemein gehaltene Urteil Bergs als mit der Erfahrung nicht ganz übereinstimmend.

93. Die Kernverluste sind nach Berg grösser bei Drehstrommotoren als bei Gleichstrommotoren; das wird in manchen Fällen richtig sein; immerhin wäre ein ziffernmässiger Nachweis, bei dem namentlich auch anzugeben wäre, welcher Puls für den Drehstrom vorausgesetzt wird, notwendig, um den Bereich der Richtigkeit dieser Angabe prüfen zu können.

Auch muss beachtet werden, dass es seit einiger Zeit ein wesentlich besseres Eisen gibt als früher, das ein Niederhalten der Eisenverluste erleichtert (s. Fig. 22).

94. Aus der Voraussetzung der höheren Stromwärme- und Eisenverluste wäre auf wesentlich schlechteren Wirkungsgrad beim Drehstrommotor zu rechnen. Beim Vergleich ausgeführter Motoren finde ich:

	PS	Wirkungsgrad %				
		1/4	1/2	3/4	1/1 Last	
Amerik. Gleichstrommotor	41	73	84	84	83	
„ „	80	70	83	85	85	
„ „ (ohne Vorgelege)	200	92	94	93	91	(Gewicht 5200 kg).
Drehstrom, Burgdorf-Thun (Brown, Bovéri & Co.)	60	76	81	84	85	(einschl. Vorgelege u. Transformator).
Drehstrom, 10000 Volt (Siemens & Halske)	220	80	85	87	89	(einschl. Vorgelege Gew. total 4090 kg).

Die Unterschiede sind nicht erheblich und lassen bei Berücksichtigung der dem Konstrukteur bleibenden Freiheiten erkennen, dass man den Wirkungsgrad bei beiden Motorarten auf gleiche Höhe bringen kann. Diese Erkenntnis ist allerdings lediglich als eine Bestätigung von längst Bekanntem anzusehen — so weist auch Prof. Dr. Niethammer in seinem Vortrag darauf hin (s. Vorwort S. 12) — und daher hier nur aufgeführt, um die irrtümliche Auffassung Bergs zu widerlegen.

95. Aus der Annahme schlechteren Wirkungsgrades folgert Berg, dass die Drehstromausrüstung eine wesentlich schwerere sein müsse — ceteris paribus — als die Gleichstromausrüstung. Zu dieser Ansicht soll zunächst auch eine Tabelle (S. 55) die Illustration liefern.

Im übrigen kann auch noch einmal auf 92 hingewiesen werden.

96. Die Verluste sind nach Berg namentlich in der Beschleunigungsperiode im Drehstrommotor viel ungünstiger als im Reihenschlussmotor — natürlich nimmt er dabei an, dass eine andere Art des Anfahrens als mit Anlasswiderstand ohne Polschaltung oder Änderung des Magnetismus nicht in Frage käme —. Wenn man der letzteren Annahme auch ohne weiteres widersprechen könnte, so ist es doch nützlich, den Ableitungen Bergs gerade an dieser Stelle zu folgen. Er rechnet so:

Vergleichende Angaben über die Gewichte moderner Gleichstrom- und Drehstromeisenbahnmotoren.

PS	Gleichstrom kg	Drehstrom 400 Touren kg	Drehstrom 500 Touren kg
15	—	570	480
20	—	720	570
21	664	—	—
25	—	860	—
27	757	—	—
30	—	990	660
32	880	—	—
35	—	1120	740
37	980	—	—
40	—	—	820
41	1080	—	—
45	—	—	900
50	1250	—	—
52	1350	—	—
60	—	—	1120
80	1720	—	1400
100	—	—	1680

Bei Stillstand sind sowohl im Lauf als auch im Läufer Eisenverluste vorhanden, von denen jeder ungefähr ebenso gross ist, wie der höchste im Anker eines Gleichstromserienankers zu erwartende Kernverlust; bei voller Drehzahl ist der Kernverlust im primären Teil unverändert, im sekundären Teil Null, weil dieser nur äusserst langsame Ummagnetisierung erfährt. — Beim Gleichstrommotor ist dagegen der Eisenverlust bei Stillstand Null und bei höchster Tourenzahl etwa gleich dem Eisenverlust des mit voller Geschwindigkeit laufenden Drehstrommotors. Für die Anlaufzeit ist also im Mittel der Eisenverlust beim Reihenschlussmotor gleich $^1/_2$ und beim Drehstrommotor gleich $^3/_2$ zu setzen. Hierzu kommt nun beim Drehstrommotor noch der höhere Stromwärmeverlust, so dass im ganzen bei der Anfahrt im Drehstrommotor etwa ein viermal grösserer Verlust, also auch viermal grössere Erwärmung zu erwarten ist, als beim Gleichstrommotor. Dies Resultat deckt sich im wesentlichen mit der Berechnung von Prof. Niethammer (s. Vorwort S. 12).

Die Betrachtungen Bergs, solange sie rein qualitativ aufgestellt werden, sind nicht gerade durchaus unrichtig; quantitativ sie zu verfolgen, bedingt nähere Kenntnis der von Berg gemeinten speziellen konstruktiven Ausführungen. Hierfür fehlt leider in dem betreffenden Aufsatz jeder Anhalt, man muss also auf anderweitig verfügbares Material zurückgreifen. Bei dem Motor der Burgdorf-Thun-Bahn wird der Eisenverlust bei voller Umdrehungszahl vielleicht 4 % betragen und bei Still-

stand auf 6,8 % steigen; diese Steigerung ist ermittelt auf Grund der Annahme, dass die magnetische Beanspruchung des Läufers etwa dieselbe ist, wie die des Laufs, und folgt dabei dann einfach aus der Vermehrung des der Ummagnetisierung ausgesetzten Mehrgewichtes; dabei ergibt sich das Gewicht des Laufs zum Läufer wie 3 : 5 und nicht, wie Berg annimmt, wie 1 : 1.[1])

Die Zunahme der Verluste beträgt bei dieser Ausführung also nur $^{70}/_{100}$ und nicht $^{100}/_{100}$, wie Berg rechnet; es liessen sich indessen Motoren mit noch günstigeren Verhältnissen bauen.

Nun ist der Zusammenstellung in 94 zu entnehmen, dass der Wirkungsgrad eines dem Burgdorf-Thun-Bahnmotor entsprechenden Gleichstrommotors ca. 85 % beträgt; für Stromwärme sind von den 15 % Verlusten 6 % und für Reibung 5 % zu rechnen, so dass auf Eisenwärme 4 % kommen.

Der mittlere Eisenverlust ist also

a) Drehstrom. (Anfahrt mit 1,7fachem, volle Drehzahl mit 1fachem Eisenverlust) Mittel: 1,35facher Eisenverlust.

b) Gleichstrom. (Anfahrt ohne Eisenverlust, gleich darauf bei hoher Eisenbeanspruchung — der Motor ist nahezu gesättigt — und niedrigem Puls etwa halber Eisenverlust steigend bis zu einfachem Verlust bei voller Drehzahl) Mittel: 0,75facher Eisenverlust, sehr günstig gerechnet.

Die Eisenwärmen verhalten sich

$$\frac{\text{Gleichstrom}}{\text{Drehstrom}} = \frac{0{,}75}{1{,}35} = \text{ca. } \frac{1}{2}$$

(gegen die Annahme von $\frac{1}{3}$ bei Berg).

97. Die Stromwärmeverluste bei der Anfahrt lassen sich natürlich nur unter Voraussetzung spezieller Bedingungen ermitteln. Solche stellt Berg in seiner Arbeit auf:

Es soll eine zweigleisige Bahn mit 27 Stationen aus einiger Entfernung gespeist werden; in jeder Richtung laufen 8 Züge, die in je 52 Sekunden die ganze Strecke durchmessen.

---

[1]) Wieweit diese Rechnung noch weiter zu Ungunsten des Drehstrommotors angenommen ist, ist gegenwärtig nicht genau anzugeben (vergl. Vorwort S. 18 und Elektrotechnische Zeitschrift 1901, S. 699, sowie 1902, S. 745). An ersterer Stelle gibt Dr. Benischke folgende Messungen an Drehstrommotoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft an:

	2 PS-Motor	7 PS-Motor
Puls	50 Perioden	50,3 Perioden
Eisenverluste		
1. bei Leerlauf	76,8 Watt	272 Watt
2. „ Stillstand	79,6 „	262 „
3. „ geöffneter Läuferwicklung	62,7 „	234 „

Zuggewicht 90 t.
Adhäsionsgewicht 50 t.
Grösster Zug am Haken 11300 kg.
Erreichbare Anfangsbeschleunigung 0,61 m (?)
Stationsentfernung 780 m.
Reisegeschwindigkeit 24 km/Std.
Meistgeschwindigkeit 43,5 km/Std.
Fahrzeit 95,5 Sek.
Aufenthalt auf der Station 20 Sek.

Steigungen und Einfluss der Bahnkurven sollen vernachlässigbar sein. Behandelt wurden drei Lösungen:

A. Gleichstromsystem mit Serien-Parallelschaltung.
B. Drehstromsystem mit Widerstandsregulierung.
C. Drehstromsystem mit Tandemschaltung beim Anfahren und beim Bremsen.

Auf Bremsgewinn wird verzichtet, weil bei der grossen Stromentnahme und der Komplikation der Regelung und des Motorentwurfes (!) der Vorteil angeblich durch Nachteile aufgehoben werden würde.

98. Ein ganz genaues Eingehen auf Bergs Diagramme und Berechnungen ist in dem wünschenswerten Mafs leider dadurch sehr erschwert, dass eine Reihe wichtiger Einzelheiten nicht angegeben worden sind, die man dann nur nach bestem Wissen und Können ergänzen kann. Ich glaube nach mir vorliegendem Material berechtigt zu sein, anzunehmen, dass für Gleichstrom auf zwei Motoren von je 2500 kg Gewicht gerechnet ist, die mit 1 : 3 übersetzt die Achsen antreiben. Der Widerstand jedes Motors würde 0,1 Ohm betragen.[1])

Nun stellt Berg das in Fig. 25 schwach gezeichnete Diagramm für eine Fahrt auf, wobei der Rollwiderstand des Zuges vernachlässigt ist; das ist, wenn man einwandsfreie Resultate erhalten will, durchaus unzulässig; es ist deshalb aus der von Berg für das Auslaufen des Zuges angenommenen Verzögerung der Grundwiderstand berechnet worden. Berg lässt den Zug in 34 Sekunden 4,5 miles pro Stunde, d. i. 2 m pro sek. Geschwindigkeit verlieren, das entspricht 0,0588 m/sek.^{2}, woraus ein Grundwiderstand von ca. 6 kg pro t folgt. Hiernach haben wir also rund 600 kg Zug für Überwindung der Reibung zu rechnen.

Berg rechnet nun für den Beginn der Fahrt 390 Ampère, womit aus der Charakteristik des Motors eine Zugkraft von 2200 kg pro Motor

[1]) Während des Druckes stellte sich heraus, dass diese Annahme einen Irrtum enthält, da Berg mit 160 t-Zügen und 4 Motoren rechnet und 1000 Volt Spannung annimmt. Dadurch ändert sich grundsätzlich an der folgenden Betrachtung aber nichts, da die Kurven alle unter obigen Voraussetzungen gezeichnet sind, also die Verhältnisse für 90 t-Züge darstellen. Für grösseres Zuggewicht würde also lediglich annähernd proportionale Veränderung nötig sein, die einen kleinen Vorteil für Drehstrom einschlösse.

oder 4400 kg am Haken folgt, von denen 600 für Reibung und 3800 für Beschleunigung in Frage kommen; die Anfangsbeschleunigung ist danach

$$\frac{3800}{9000} = 0{,}423,$$

während Berg mit 0,445 rechnet, und bei Serienschaltung der Motoren kann man bei der angegebenen Stromstärke bis zu 15 km Geschwindigkeit kommen; diese Geschwindigkeit tritt nach 10 Sekunden ein, dann also ist auf Parallelschaltung umzulegen. Die Stromaufnahme ist von

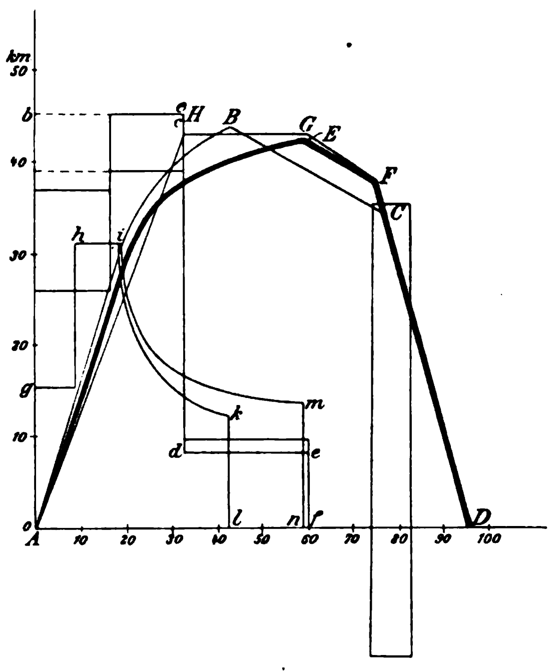


Fig. 25. *ABCD* = Fahrbild nach Berg. — *AEFD* = Fahrbild unter Berücksichtigung des Rollwiderstandes. — *AHGFD* = Fahrbild bei Drehstrom ohne Polumschaltung. — *abcdef* = Arbeitsverbrauch bei Drehstrom. — *aghike* = Arbeitsverbrauch bei Gleichstrom nach Berg. — *aghimn* = Arbeitsverbrauch bei Gleichstrom unter Berücksichtigung des Rollwiderstandes. (Die übrigen Linien des Berg'schen Diagramms sind nur zur Wahrung der Übereinstimmung mit dem Original mit abgedruckt.)

Sekunde 10 an 780 Ampère; die Geschwindigkeit steigt in weiteren 10 Sekunden auf 30 km und nähert sich danach bei abnehmender Stromstärke, wobei jetzt der Einfluss des Rollwiderstandes der abnehmenden Zugkraft des Reihenschlussmotors gegenüber mehr hervortritt, allmählich der erforderlichen Meistgeschwindigkeit von 41,5 km/Std., die nach weiteren 30 Sekunden erreicht wird. Das entsprechende Fahrbild zeigt die starke Kurve in Fig. 25. Der Verbrauch kann ungefähr nach den ins Diagramm eingetragenen mittleren Stromstärken berechnet werden; für Annahme von 500 Volt Netzspannung findet man:

	Leistungsverbrauch	Arbeitsverbrauch
1. Reihenschaltung	190 Kw	1900 Kw-Sek.
2. Parallelschaltung a)	380 „	3800 „
b)	380—220 „	5600 „
	zusammen	12500 Kw-Sek.

99. Für die Ermittelung der im Motor auftretenden Erwärmung ist massgebend der Arbeitsverlust während der Anfahrt und die Pause nach Beendigung der Anfahrt bis zur erneuten Inanspruchnahme des Motors.

Der Arbeitsverlust des Gleichstrommotors besteht aus

1. 0,75 × Eisenverluste pro Sekunde × Anfahrtzeit (vergl. 96)	$= 5{,}85 \cdot 52 = 304$ Kw-Sek.
2. vollem Stromwärmeverlust während der ersten 20 Sekunden	$= 390^2 \cdot 0{,}1 \cdot 20 = 304$ „
3. sich verringerndem Stromwärmeverlust (im Mittel $\frac{390^2 + 125^2}{2}$ 0,1 Watt) während der nächsten 32 Sekunden	$= 8{,}4 \cdot 32 = 268$ „
im ganzen	$= 876$ Kw-Sek.

100. Dem stehen gegenüber beim Drehstrommotor nach dem von **Berg** angenommenen Fahrdiagramm:

1. 2facher Eisenverlust während der Anfahrt (8 % des Verbrauchs pro Motor, der bei 85 % Wirkungsgrad 226 Kw beträgt, während 32 Sekunden)	508 Kw-Sek.
2. 1facher Eisenverlust während weiterer 28 Sekunden	222 „
3. Stromwärme während 32 Sekunden voll	254 „
4. Stromwärme mit $^1/_4$ Stromstärke während weiterer 28 Sekunden	14 „
im ganzen	= 998 Kw-Sek.[1]

101. Der Drehstrommotor hat also bei **Bergs** Anordnung 122 Kw-Sekunden mehr in Wärme zu verwandeln und abzugeben, d. i. 14 %, und nicht, wie dort angenommen wird, 300 %! Bei alledem sind die Verhältnisse für Gleichstrom besonders vorteilhaft gewählt und ist für Drehstrom unvorteilhaft gerechnet. Auch ist angenommen, dass der Fahrer stets im genau richtigen Moment von Reihenschaltung auf Parallelschaltung übergeht, dass beide Motoren genau gleich arbeiten und insbesondere bei der Reihenschaltung nicht ein Räderpaar schleudert. Treffen diese Voraussetzungen nicht zu, so wird die Erwärmung des Reihenschlussmotors sofort grösser (vergl. hierzu 64) und ein Unter-

[1]) Würde nach den Messungen von Dr. **Benischke** eine Erhöhung der Eisenwärme beim Anlauf nicht angenommen, so käme nur ein Arbeitsverlust von 744 Kw-Sek. in Frage.

schied zwischen Drehstrom und Gleichstrom bleibt dann praktisch nicht mehr übrig.

Die Pausen für die Abkühlung sind nahezu gleich gross; die Verhältnisse liegen aber praktisch für Drehstrommotoren insofern günstiger, als bei diesen hermetische Kapselung — wie die mehrjährige Erfahrung der Burgdorf-Thun-Bahn lehrt — nicht erforderlich ist, vielmehr eine Ventilation der Gehäuse keinen Schaden macht. Beim Gleichstrommotor ist die Öffnung der Gehäuse bisher noch nicht als unbedingt durchführbar erwiesen, wenn sie auch mehrfach versucht worden ist.

102. Die Berechnung des Arbeitsverbrauches am Zuge muss natürlich zu Ungunsten des Drehstrommotors ausfallen, solange man Bergs Voraussetzungen festhält.

Die Beschleunigung ist während der ganzen Anfahrtzeit konstant gewählt und etwas geringer angenommen, wie die Anfangsbeschleunigung bei Gleichstrom. In 32 Sekunden werden 11,8 m/Sek. erreicht. Die Beschleunigung ist also 0,37. Daraus folgt für den Zug am Haken:

$$0{,}37 \cdot 9000 + 6 \cdot 90 = 3870 \text{ kg.}$$

Diesem konstanten Zuge entspricht die Höchstleistung (Kraft × Geschwindigkeit)

$$\frac{3870 \cdot 11{,}8}{75} = 610 \text{ PS.}$$

Aus der von Berg für Drehstrom angegebenen, sehr vorsichtigen Wirkungsgradkurve würde folgen bei 5 % Zuschlag zur Leistung für das Rädervorgelege (also bei 320 PS pro Motor) ein Wirkungsgrad von 91 %, so dass der Verbrauch während der Anfahrt pro Motor

$$\frac{320 \cdot 736}{1000 \cdot 0{,}91} = 258 \text{ Kw,}$$

der Gesamtarbeitsverbrauch also

$$2 \cdot 258 \cdot 32 = 16500 \text{ Kw-Sek.}$$

beträgt, d. i. ca. 32 % mehr als bei Gleichstrom![1])

Es kommt hierzu noch ein Betrag von

$$\frac{11{,}8 \cdot 90 \cdot 6 \cdot 736}{0{,}90 \cdot 75} = 70 \text{ Kw}$$

für freie Fahrt während 28 Sekunden, also 1960 Kw-Sek., und es ergibt sich als Gesamtverbrauch

bei Drehstrom 18460 Kw-Sek.[2])

gegen

bei Gleichstrom 12500 „

d. h. der Drehstrommotor verbraucht hier 5960 = 48 % mehr!

---

[1]) Bei 160 t-Zügen ergibt sich für Gleichstrom der Verbrauch zu 23200 Kw-Sek., für Drehstrom zu 29500 Kw-Sek. Dies Verhältnis ist für Drehstrom etwas günstiger; der Mehrverbrauch beträgt danach nur 27 %.

[2]) Bei 160 t-Zügen 33000 Kw-Sek., d. i. 42 % mehr.

103. Das gefundene Mehr an Verbrauch hat seine Ursache einmal darin, dass während der ganzen Anfahrt Leistung im Anlasser vernichtet werden muss, und zweitens darin, dass die Beschleunigung bis zum Ende der Anfahrt konstant gehalten wird. Die Mittel, diese beiden Nachteile zu vermeiden, sind aber bereits in Abschnitt V gegeben, so dass eine Beunruhigung durch dies Resultat nicht hervorgerufen zu werden braucht.

104. Um vorerst indessen im Rahmen vorliegender praktischer Ausführungen zu bleiben, soll zunächst noch mit den für Drehstrom ungünstiger als nötig gewählten Betriebsbedingungen weiter gerechnet und die Prüfung auf die weiteren durch den Verkehr gegebenen Bedingungen ausgedehnt werden. Dann ist festzustellen, dass für unsere Verhältnisse eine Stationsentfernung von 780 m offenbar ein Minimum bedeutet; bei der Berliner Stadtbahn sind die Entfernungen:

Station	Entfernung
Westend	
	3000
Charlottenburg	
	1200
Savignyplatz	
	1100
Zoologischer Garten	
	800
Tiergarten	
	1100
Bellevue	
	1700
Lehrter Bahnhof	
	1400
Friedrichstrasse	
	1100
Börse	
	1300
Alexanderplatz	
	1000
Jannowitz-Brücke	
	1200
Schlesischer Bahnhof	
	1300
Warschauer Strasse	
	1000
Stralau-Rummelsburg	

im Mittel 1320 m,

bei der Wannseebahn

Station	Entfernung
Berlin	
	1800
Gr.-Görschenstrasse	
	3000
Friedenau	
	2000
Steglitz	
	2300
Gr.-Lichterfelde-West	
	2800
Zehlendorf	
	3500
Schlachtensee	
	1700
Nikolasee	
	1500
Wannsee	
	4700
Neubabelsberg	
	2500
Nowawes	
	1600
Potsdam	

im Mittel 2500 m.

Rechnet man nun einmal die Verhältnisse für die mittlere Entfernung von 1320 m[1]) aus, so findet man bei Beibehaltung der von Berg angewandten Methoden und für gleiche Reisegeschwindigkeit wie dort etwa Fahrdiagramme nach Fig. 26.

---

[1]) Dies entspricht auch der Annahme anderer Autoren. Vergl. z. B. Pforr, Glasers Annalen 1900, S. 92, u. a. m.

Für Gleichstrom wird der Verbrauch um 1330 Watt-Sek., für Drehstrom um 560 Watt-Sek. erhöht; es ergibt sich als Gesamtverbrauch:

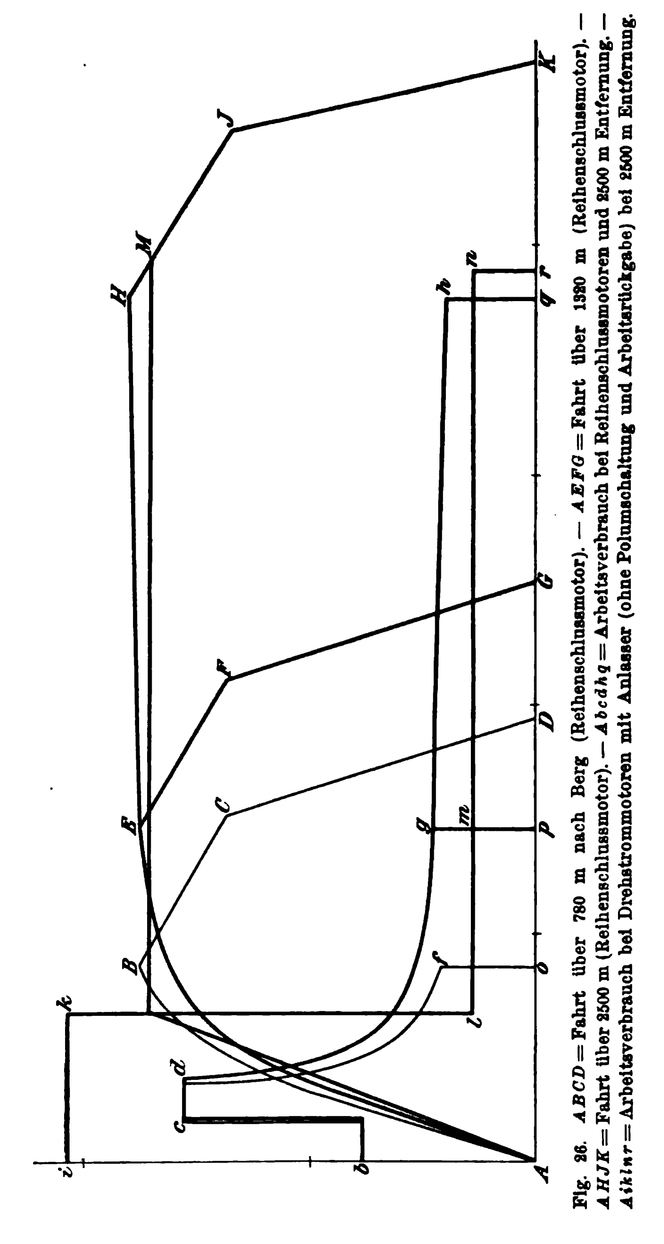


Fig. 26. *ABCD* = Fahrt über 780 m nach Berg (Reihenschlussmotor). — *AEFG* = Fahrt über 1320 m (Reihenschlussmotor). — *AHJK* = Fahrt über 2500 m (Reihenschlussmotor). — *Abcdhq* = Arbeitsverbrauch bei Reihenschlussmotoren und 2500 m Entfernung. — *Aiklnr* = Arbeitsverbrauch bei Drehstrommotoren mit Anlasser (ohne Polumschaltung und Arbeitsrückgabe) bei 2500 m Entfernung.

für Drehstrom 18980 Watt-Sek.

gegen

für Gleichstrom 13830 „

d. i. 37 % mehr Verbrauch bei Drehstrom!

Diese Zahlen können wir noch durch Annahme eines anderen Fahrplanes um einige Prozent hinüber und herüber verschieben, werden aber im wesentlichen das Resultat nicht ändern.

105. Bei der für die Wannseebahn ermittelten mittleren Stationsentfernung von 2500 m würde aber — wieder gleiche Geschwindigkeitsverhältnisse vorausgesetzt — der Unterschied im Arbeitsverbrauch beinahe schon ganz ausgeglichen sein, denn nach Fig. 26 ermittelt sich der Verbrauch für Gleichstrom zu 26000 Kw-Sek. und für Drehstrom zu 28400.

106. Indem wir jetzt weiter gehen, halten wir also fest, dass ganz abgesehen von den hier vorher mit aufgeführten, theoretisch einwandfreien, bisher praktisch aber noch nicht angewandten Methoden zum Anfahren mit Drehstrom ohne übermässige Stromwärmeverluste bereits nach dem allgemein bekannten System der in Betrieb befindlichen Bahnen eine merkliche Unterscheidung der Wirtschaftlichkeit zwischen der Arbeitsweise der Drehstrommotoren und der der Gleichstrommotoren als solcher (d. i. abgesehen von den Verhältnissen des zugehörigen Netzes und der zugehörigen Krafthäuser) nur bei den denkbar kleinsten, ausnahmsweise vorkommenden Stationsentfernungen nachweisbar ist, dass diese aber bereits im Vorortbahnbetriebe aufhört, natürlich gleiche Gewichte des gesamten Treibwerkes vorausgesetzt.

107. Wenn nun dazu noch angenommen wird, die in 78 beschriebene Bremsung mit teilweiser Rückgabe des Arbeitsvermögens der Züge an die Zentrale werde eingeführt, so können wir folgendermassen rechnen:

Ein Wiedergewinn der Massenladung ist z. B. zwischen der vollen und der halben Geschwindigkeit möglich; das dabei frei werdende Arbeitsvermögen ist

$$M \frac{v_1^2 - v_2^2}{2},$$

d. i.

$$9000 \frac{11{,}8^2 - 5{,}5^2}{2} = 490500 \text{ m/kg}$$
$$= 4800 \text{ Kw-Sek.}$$

Gelingt es, von diesem Betrage wirklich auch nur die Hälfte der Zentrale wieder nutzbar zuzuführen, so können wir vom Aufwand für die Fahrt 2400 Kw-Sek. abziehen und erhalten die Werte in Kolumne III der folgenden Tabelle.

108. Nehmen wir nun in der gewiss zutreffenden Voraussetzung, dass bei neuen Bauten auch neue Gedanken verwirklicht werden dürfen,[1]) weiter an, dass wir mit Polumschaltung nach

---

[1]) Ich halte es für durchaus unrichtig, konstruktiven Vorschlägen eines vorteilhaft erscheinenden Projektes mit dem Einwand begegnen zu wollen, es liege bisher keine

65 und Dreiecksumschaltung nach 64 anfahren und mit Energierückgabe bremsen, so tritt kein grösserer Arbeitsaufwand bei der Anfahrt auf, als bei Gleichstrom, im Gegenteil sogar ein geringerer; doch soll mit gleichem Arbeitsaufwand bei der Anfahrt gerechnet werden, weil nicht in Abrede zu stellen ist, dass wir jetzt die Drehstrommotoren infolge ihrer Beanspruchung ohne Pause reichlich zu bemessen haben, also vielleicht etwas schwerer bauen müssen, als sonst erforderlich wäre. Wir erhalten so Kolumne IV.

Stationsentfernung	Anfahrten mit: Gleichstrom	Drehstrom mit Anlasser	Drehstrom mit Umschaltung
870	12500	16060	10100
1250	13830	16580	11430
2500	26000	28400	23600

109. Diese Zahlen dürfen gewiss mit Recht bei der weiteren Prüfung von Bergs Berechnungen zu Grunde gelegt werden; sie sind für Gleichstrom günstiger angenommen, als praktische Messungen ergeben (vergl. Vorwort S. 6), und werden daher für Drehstrom keine Schönfärbung zulassen.

110. Für Gleichstrom sind nach Berg vier Unterstationen erforderlich mit je drei 650 Kw-Drehumformern, von denen einer in Reserve steht, und je zehn 240 Kw-Transformatoren. Der Wirkungsgrad der Transformatoren beträgt 97 %, der der Umformer 94 %. Wenn alle Speiseleitungen und Arbeitsleitungen zusammenhängen, findet sich nach Berg[1]) für 16 gleichz. l. Züge:

	a) die mittlere Leistung einer Unterstation .	760	Kw	
	„ höchste „ „ „ .	1600	„	
woraus	„ mittlere Nutzleistung der Zentrale . .	3040	„	
	„ höchste „ „ „ . .	4400	„	
	b) der mittlere Verbrauch eines Umformers .	832	„	($\eta = 91{,}5$)
	„ höchste „ „ „ .	1910	„	($\eta = 84$)
woraus	die mittlere Gesamtleistung der Zentrale	3650	„	($\eta = 83{,}3$)
	„ höchste „ „ „	5650	„	($\eta = 78$).

111. Für Drehstrom sollen nach Berg auch vier Unterstationen vorgesehen werden mit je vier Transformatoren zu 700 Kw. Die Zentrale bekommt fünf 1800 Kw-Generatoren. Berg berechnet

die mittlere Leistung pro Unterstation zu	1290	Kw	
„ maximale „ „ „ „	2300	„	
„ mittlere Nutzleistung der Zentrale . .	5150	„	
„ maximale „ „ „ . .	7100	„	
„ mittlere Gesamtleistung der Zentrale	5600	„	($\eta = 92\,\%$)
„ maximale „ „ „	7800	„	($\eta = 91\,\%$).

Ausführung vor; ein solcher Einwand kann höchstens die Anordnung eines Probebetriebes rechtfertigen.

[1]) Also für 160 t-Züge.

Obigen Zahlen entnimmt man leicht die beigeschriebenen Wirkungsgrade, mit denen offenbar gerechnet ist; wenn auch die Einführung einfacher Mittelwerte an dieser Stelle sehr anfechtbar ist,[1]) so soll doch, da es sich hier ja nur um allgemeine Vergleiche handelt, dies von Berg benützte Verfahren unter Vorbehalt Anwendung finden.

112. Mit Einsetzung der Werte aus 107 finden wir in grober Annäherung:

I. Stationsentfernung 870 m.

	Gleichstrom	a	b
Mittlere Leistung pro Unterstation . . .	760	980 Kw	615 Kw
Maximale „ „ „ . . .	1600	2055 „	1290 „
Mittlere Gesamtleistung der Zentrale . .	3650	4690 „	2950 „
Maximale „ „ „ . .	5650	7250 „	4560 „

II. Stationsentfernung 1250 m.

(Reduktion a) mit $\frac{17}{14}$, b) mit $\frac{11}{14}$)

	Gleichstrom	a	b
Mittlere Leistung pro Unterstation . . .	841	1015 „	695 „
Maximale „ „ „ . . .	1770	2120 „	1460 „
Mittlere Gesamtleistung der Zentrale . .	4040	4840 „	3340 „
Maximale „ „ „ . .	6250	7480 „	5280 „

III. Stationsentfernung 2500 m.

(Reduktion a) mit $\frac{28}{26}$, b) mit $\frac{24}{26}$)

	Gleichstrom	a	b
Mittlere Leistung pro Unterstation . . .	1580	1740 „	1430 „
Maximale „ „ „ . . .	3330	3640 „	3000 „
Mittlere Gesamtleistung der Zentrale . .	7590	8300 „	6900 „
Maximale „ „ „ . .	11770	12850 „	10900 „

Diese Tabellen sind durch Reduktion nach den ermittelten Verbrauchswerten unter Berücksichtigung der von Berg angesetzten Wirkungsgrade berechnet, also wieder zu Ungunsten des Drehstromes, so dass die grobe Annäherung dem vorliegenden Zwecke genügt.

113. Berg nimmt an, dass seine Bahn 27 Stationen habe und dass die mittlere Stationsentfernung 780 m sei. Daraus folgt, dass die Bahn eine Länge von rund 20 km hat. Über diese 20 km sind 4 Unterstationen verteilt, jede Unterstation versorgt somit rund 5 km. (Man vergleiche hierzu, was über Unterstationen im Vorwort S. 5 gesagt ist.) Zwischen 2 Unterstationen liegen 6—7 Eisenbahnstationen. Da, wie in 110 gesagt wurde, in jeder Fahrrichtung gleichzeitig 8 Züge über die Bahn laufen, speist jede Unterstation im Durchschnitt 4 Züge und eine gleich grosse Zahl von Zügen befindet sich zwischen zwei Unterstationen.

Es ist bei dieser Sachlage nicht ausgeschlossen, dass mindestens zwei Züge auf der Mitte zwischen zwei Unterstationen gleichzeitig an-

[1]) Wie schon aus der Grössenordnung der Wirkungsgradzahlen hervorgeht.

fahren und bei 500 Volt eine Stromentnahme von $2 \cdot 780$ Ampère[1]) verursachen; um für Gleichstrom die günstigsten möglichen Annahmen zu machen, soll aber hier die äusserste zulässige Motorspannung von 1000 Volt zu Grunde gelegt werden; der Strombedarf ist dann 780 Ampère.[2])

Der Widerstand der Arbeitsleitung und der vier parallel geschalteten Fahrschienen ist zwischen zwei Unterstationen gemessen 0,25 Ohm — wenn der Zug auf der Mitte steht bis zum Zuge also beiderseits $\frac{1}{2} \cdot 0{,}25$ Ohm — für die Oberleitung ist dabei bei ca. 10 mm starkem Kupferdraht 0,15 Ohm angenommen und über die zur Abnahme der 390 Ampère pro Zug dienenden Einrichtungen nichts Näheres gesagt —, der Spannungsverlust also unter der Annahme, dass eine Stromaufnahme an den nicht anfahrenden Zügen nicht stattfindet, $\left(\frac{1}{2} \cdot 780\right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0{,}25\right)$[3]) = rund 50 Volt, d. i. 5 %.

114. Die 5 % Spannungsabfall bedingen eine Abänderung des Fahrbildes um einige Prozent. Der Einfluss ist allerdings noch kein übermässiger, wenn er auch unbedingt die Verhältnisse verschlechtert. Aber das angenommene Zuggewicht ist nur 90 t; dem sind bei uns vorkommende Zuggewichte von mehr als doppelter Grösse gegenüber zu stellen. Beim Probebetrieb auf der Wannseebahn beispielsweise ist das Zuggewicht 210 t gewesen.[4])

Bei diesem Zuggewicht wäre auf mehr als doppelte Stromstärke, also auch auf doppelten Spannungsabfall, d. i. 10 %, zu rechnen; das Fahrbild wäre jetzt nach Fig. 27 zu zeichnen.

Das Ergebnis ist sehr interessant, da es besagt, dass mit den 90 t-Zügen die Bahn schon an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit steht und bei Erhöhung des Zuggewichtes um so viel, als wir für hiesige Verhältnisse verlangen müssen, beinahe versagt. Um dem abzuhelfen, muss man auf der 780 m Strecke entweder die Beschleunigung erhöhen, d. i. den Arbeitsverbrauch beim Anfahren und die Grösse der Motoren, oder bis zum Einsetzen der Bremsen beschleunigen und hierbei für je 90 t Zuggewicht 2000 Kw-Sekunden mehr aufwenden, oder man muss die Leitungen verstärken oder die Fahrzeit erhöhen.

115. Der Spannungsverlust bei Drehstrom beträgt nach Annahme von Berg ca. 6 % auf der Leitung bis zum Zuge. Ersetzen wir Bergs Anordnung durch eine Arbeitsleitung mit 10000 Volt Spannung, so haben wir zwischen zwei Speisepunkten (entsprechend den Unterstationen im obigen Falle) beim gleichzeitigen Anfahren zweier Züge und einer

---

[1]) Gemeint sind 90 t-Züge.

[2]) Bei 160 t-Zügen und 4 Motoren also rund das Doppelte.

[3]) Es ist mit halber Stromstärke zu rechnen, da die Stromzufuhr von beiden Unterstationen aus erfolgt.

[4]) Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1900, S. 1200.

Maximalleistungsaufnahme von rund 600 Kw pro Zug (keine Umschaltung auf Stern zur Ermässigung der Endbeschleunigung) bei $\cos\varphi = 0{,}85$ eine Stromstärke von

$$\frac{2 \cdot 600000}{\sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 0{,}85} = 82 \text{ Ampère.}$$

Gleiche Oberleitungskonstruktion als vorher vorausgetzt, würde der Spannungsverlust durch ohmischen Widerstand

$$\sqrt{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot 82 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0{,}15 = 54 \text{ Volt oder rund } {}^{1}/_{2}\,{}^{0}/_{0}\text{[1])}$$

und bei dreifachem Zuggewicht $1{,}5\,{}^{0}/_{0}$. Diese Spannungsverminderung erhöht sich noch um etwa den gleichen Betrag durch Selbstinduktion,

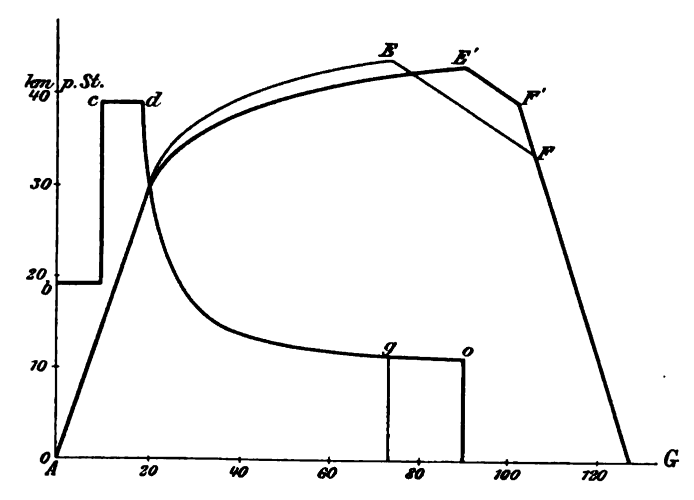


Fig. 27. Die Kurve *AEFG* entspricht Arbeitsverbrauch bei einer Fahrt 1200 m Stationsentfernung mit Gleichstrom-Serienparallelschaltung bei Berücksichtigung des Rollwiderstandes. — Die Kurve *AE'F'G* entspricht dem Arbeitsverbrauch bei einer gleichen Fahrt unter zuzüglicher Berücksichtigung eines Spannungsverlustes von $10\,{}^{0}/_{0}$ im Motor.

ist aber auch dann noch so gering, dass sie für praktische Verhältnisse in der Rechnung ruhig vernachlässigt werden kann. Die Ausrüstung erweist sich als eine solche, die noch erhebliche Steigerung der Verkehrsleistungen zulässt.

116. Es erübrigt nun noch, den letzten Teil der Berg'schen Berechnungen zu prüfen, der sich mit den Anlagekosten beschäftigt. Berg setzt an:

Vollständige Dampfmaschinenanlage einschliesslich Montage für eine 1700 Kw-Dampfmaschine pro Kw . .	200 Mk.
Hochspannungsgenerator, Schaltanlage und Instrumente pro Kw	100 „

[1]) Durch den Faktor $\sqrt{3}$ ist die Verkettung der Leitungen berücksichtigt.

(Für diese beiden Posten könnten wir einführen:

Turbogeneratoren komplett einschliesslich aller Apparate, Kessel, Gebäude, Montage u. s. w. nach Angabe von Brown, Bovéri & Co. pro Kw . . . . 240 Mk.)

Umformerstation mit Apparaten pro Kw . . . . . . 160 Mk.

Transformatoren für 700 Kw, pro Kw . . . . . . 18 „

1 Gleichstromlokomotive komplett . . . . 60000 „

1 Drehstromlokomotive komplett . . . . 76000 „

(Weshalb Drehstromlokomotiven so viel teurer als Gleichstromlokomotiven sein sollen, ist unerfindlich.)

Motorwagen zu 70 Sitzen . . . . 9000 „

Oberleitung, Tragwerk für Gleichstrom pro km . . . 2200 „

„ „ „ Drehstrom pro km . . . . 3000 „

Kupfer pro kg ca. . . . . 1,6 „

Oberbau pro km . . . . 1250 „

Schienen pro Tonne . . . . 100 „

(Kabelpreise.)

117. Hiernach ergibt sich für

A Gleichstrom.
B Drehstrom mit Anlasser.
C „ mit Tandemschaltung.

} Nach Berg. Stationsentfernung 780 m.

A′ „ für 1250 m Stationsentfernung.
A″ „ „ 2500 „ „

D Drehstrom mit Anlasser, Transformatoren, Bremsgewinn.
E Drehstrom mit Anlasser, ohne Transformatoren.
F „ „ Polschaltung u. s. w., Transformatoren, Bremsgewinn.
G Drehstrom mit Polschaltung u. s. w., ohne Transformatoren.

} Stationsentfernung 780 m.

die Tabelle S. 69.

118. Zur Beurteilung der Tabelle ist zu bedenken, dass die in Rechnung gestellte Bahn mit Gleichstrombetrieb an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit ist, während die Drehstrombahn eine Vervielfachung des Verkehrs ohne bauliche Veränderungen zulässt.

Wieweit es ferner unseren Eisenbahnverhältnissen entsprechen würde, die Zentrale so weit von den Speisepunkten entfernt anzulegen, dass nach dorthin längere Leitungen verlegt werden müssen, und wieweit es notwendig sein würde, diese Leitungen als Kabel zu verlegen, das muss dahingestellt bleiben.

Endlich ist zu bedenken, dass andere Einheitspreise für die Generatoren das Zahlenbild auch wesentlich verschieben würden.

Mit demselben Rechte, wie die Zahlen der Tabelle aufgestellt wurden, kann man folgende Endsummen unter Berücksichtigung dieser Überlegungen herausrechnen:

	A	B	C	D	E	F	G
Zentrale, Antriebsmaschinen und Zubehör	1 920 000	2 400 000	2 100 000	2 500 000	2 500 000	1 600 000	1 600 000
Generatoren	664 000	936 000	1 040 000	1 980 000	1 980 000	1 280 000	1 280 000
	2 584 000	3 336 000	3 140 000	4 480 000	4 480 000	2 880 000	2 880 000
Umformerstation	1 248 000	—	—	—	—	—	—
Transformatoren	—	202 000	202 000	202 000	—	272 000	—
	1 248 000	202 000	202 000	202 000	—	272 000	—
17 Lokomotiven	1 020 000[1]	1 292 000[2]	1 292 000	1 292 000	1 292 000	1 292 000	1 292 000
68 Anhängewagen	1 224 000	1 224 000	1 224 000	1 224 000	1 224 000	1 224 000	1 224 000
	2 244 000	2 516 000	2 516 000	2 516 000	2 516 000	2 516 000	2 516 000
Kabel einschl. Reserven	628 000	688 000	1 464 000	1 032 000	1 032 000	1 032 000	1 032 000
Arbeits- und Speiseleitungen	196 000	124 000	124 000	130 000	130 000	124 000	124 000
	824 000	812 000	1 588 000	1 162 000	1 162 000	1 156 000	1 156 000
Oberbau	436 000	436 000	436 000	436 000	436 000	436 000	436 000
Tragwerk der Oberleitung	93 600	124 800	124 800	124 800	124 800	124 800	124 800
	529 600	560 800	560 800	560 800	560 800	560 800	560 800
Total	7 429 600	7 426 800	8 006 800	8 920 800	8 718 800	7 384 800	7 112 800

[1]) An dieser Stelle steht in der Veröffentlichung von Bergs Aufsatz ein Druckfehler.

[2]) Es wäre durchaus berechtigt, wenn man hier den gleichen Preis einsetzte, wie in A. Aber der Mehraufwand soll in der Endsumme belassen werden, um für die Einrichtung der Arbeitsleitung und für Blitzschutz mehr Mittel zu gewinnen, weil an dieser Stelle durchaus bestes geleistet werden muss.

A	B	D	G
6665000	6395000	6029000	5565000

und mit einem gewissen Recht für sie die grössere Wahrscheinlichkeit beanspruchen.

119. Würde man auf der Basis der in 108 überschlägig ermittelten Zahlen eine Betriebskostenberechnung aufstellen, so würde man finden, dass für Drehstrom gegen Gleichstrom eine jährliche Ersparnis möglich ist von etwa folgenden Posten:

8 Maschinisten für Unterstationen à 1250 Mk. .	10000 Mk.
Verzinsung, Abschreibung, Erneuerung 10 % von 1100000 Mk.	110000 „
Minderverbrauch an elektrischer Energie[1] . .	286000 „
zusammen	406000 Mk.

Dass man, wie für amerikanische Verhältnisse vorgeschlagen worden ist, die Bedienung der Umformerstationen durch Bahnsteigschaffner besorgen lassen könnte, erscheint mir nicht recht möglich, insbesondere nicht für Bahnen mit intensivem Verkehr; die Hauptbeanspruchung der Umformer fällt ja auch gerade mit der der Bahnsteigschaffner zusammen.

120. Alle diese Zahlengruppierungen haben aber, wie man leicht sieht, auf dem Papier grosse Elastizität; je nachdem man die Betriebsbedingungen nach der einen oder anderen Seite etwas verändert, erhält man bei der Verallgemeinerung verschiedene Resultate. Das Eine haben alle Ergebnisse gemeinsam, nämlich, dass sie bei Berücksichtigung aller Bedingungen und Möglichkeiten dem Drehstrommotor mindestens ebenso günstig sind, als dem Gleichstrommotor, nach den hier aufgestellten Überlegungen sogar günstiger. Denn zusammenfassend können wir jetzt

---

[1]) Ermittelung des Energieverbrauchs.

Bei 5 Minuten Verkehr täglich:

$$24 \cdot 20 = 480 \text{ Züge},$$

$$\frac{42 \cdot 12500 \cdot 9}{5} = \text{täglicher Arbeitsverbrauch für Gleichstrom}$$
$$= 45000 \text{ Kw-Std. täglich},$$

$$45000 \cdot 365 = 16400000 \text{ Kw-Std. jährlich}.$$

Bei 5 Pf. pro Kw-Std. kostet die Energie am Zuge jährlich

820000 Mk.,

hierzu Verluste: 5 % Arbeitsleitung, 6 % Umformer, 3 % Transformator } Wirkungsgrad 86,5 %.

Daher Unkosten an den Klemmen der Unterstationen

950000 Mk.

Für Drehstrom ist der Verbrauch pro Fahrt statt 12500 nur 10100; also Kosten der Energie am Zuge

660000 Mk.,

hierzu $^1/_2$ % Verluste auf der Arbeitsleitung

664000 Mk.

im Gegensatz zu Berg auch für die Bedingungen schwersten Eisenbahnbetriebes feststellen: Die Befürchtung, die das Todesurteil für den Drehstrommotor enthielte, wenn sie sich bewahrheitete, dass man bei seiner Anwendung auf übermässige Motorerwärmung kommen würde, erweist sich als zu weitgehend, ja man kann sogar mit Rücksicht auf die Zulässigkeit der Ventilation der Gehäuse auf geringere Temperaturen rechnen. Die Kosten der Herstellung der elektrischen Einrichtung werden für Drehstrom im Vergleich zur erreichbaren Verkehrsleistung geringer und der Betrieb wird erheblich billiger als bei Gleichstrom.

Interessant zur weiteren Beurteilung der Kosten der ersten Einrichtung einer Drehstrombahn sind die für die Burgdorf-Thun-Bahn geltenden Zahlen.[1])

Speiseleitungen	112000	Mk.
Transformatoren insgesamt 6300 Kw	128000	„
Arbeitsleitung	280000	„
Elektrische Ausrüstung von 6 Motorwagen (Automobile), 2 Lokomotiven und Beleuchtung und Heizung der Anhängewagen	188000	„
Stationsbeleuchtung und elektrische Einrichtung der Werkstatt	16000	„
Reserveteile	24000	„
im ganzen	748000	Mk.

Da die Bahn rund 40 km lang ist, so ergibt sich pro km Länge ein Preis von 18700 Mk.

Achter Abschnitt.

121. Die im 7. Abschnitt behandelten Überlegungen haben in der Praxis die vollste Bestätigung erfahren durch den nun bereits drei Jahre bestehenden Betrieb der Vollbahn „Burgdorf-Thun". In der Literatur ist dieser Betrieb leider irrtümlich wiederholt beurteilt worden, als handle es sich um eine kleine „Bergbahn". Um über die Ausdehnung des Personenverkehrs auf dieser Bahn ein zutreffendes Bild zu geben, lasse ich daher hier den einschlägigen Abschnitt 615f des Reichskursbuches folgen; damit aber auch der nicht unbedeutende Verkehr an Güterzügen u. s. w. beurteilt werden kann, gebe ich — mit gütiger Erlaubnis der Betriebsleitung — auf Taf. I auch den graphischen Fahrplan bei. Das Längsprofil der Bahn endlich zeigt Fig. 28.

---

[1]) Schweizerische Bauzeitung Bd. XXXV, No. 17.

122. Eine ausführliche Beschreibung der Bahn findet sich in der Schweizerischen Bauzeitung Bd. XXXV, No. 1 u. ff. und kann daher hier unterbleiben. Dort sind auch die Messungen von Prof. Carus Wilson berücksichtigt, von denen im Vorwort S. 15 die Rede ist. Diese Messungen waren angezweifelt worden und ich

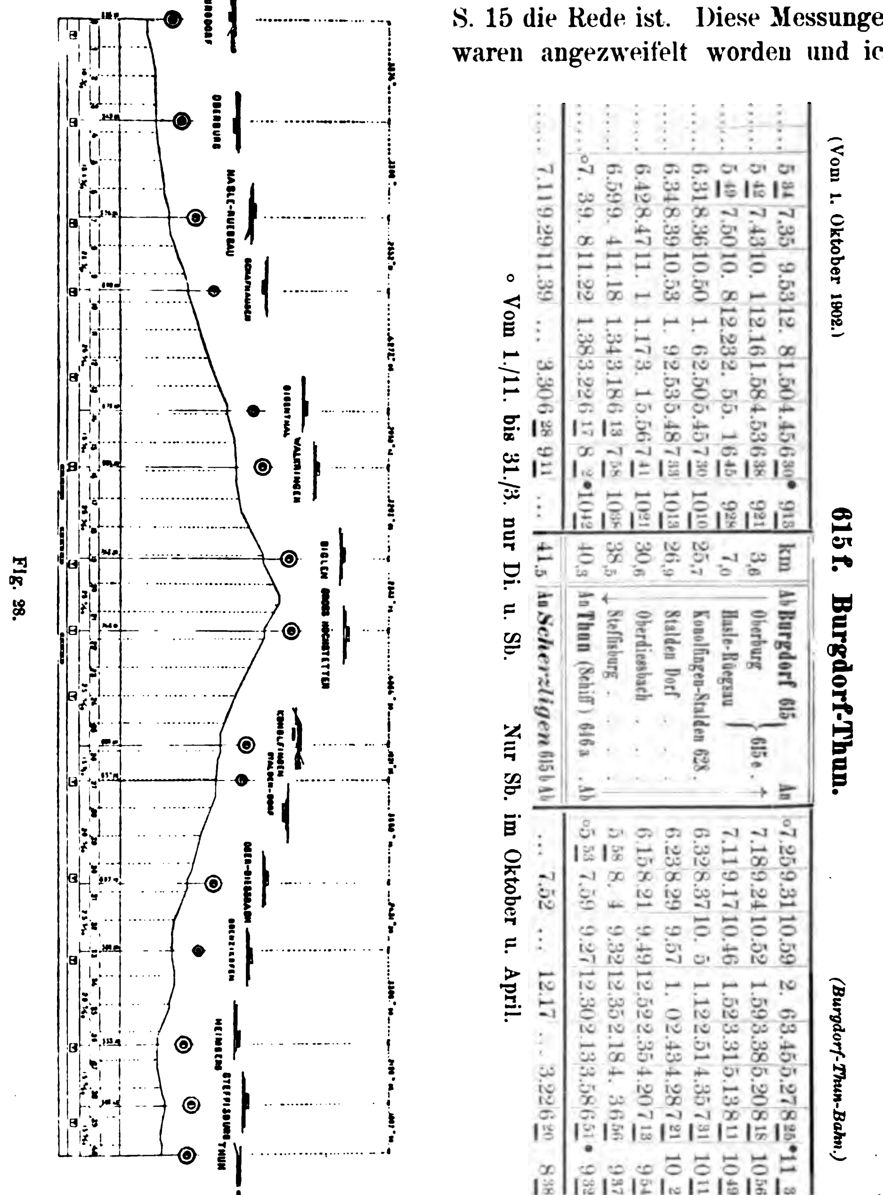


Fig. 28.

615 f. Burgdorf-Thun. (Vom 1. Oktober 1902.) (Burgdorf-Thun-Bahn.)

								km									
5.34	7.35	9.53	12.8	1.50	4.45	6.30	• 9.18		Ab Burgdorf 615 An	°7.25	9.31	10.59	2.6	3.45	5.27	8.25	• 11.3
5.42	7.43	10.1	12.16	1.58	4.53	6.38	9.21	3,6	Oberburg } 615 e	7.18	9.24	10.52	1.59	3.38	5.20	8.18	10.56
5.49	7.50	10.8	12.23	2.5	5.1	6.45	9.28	7,0	Hasle-Rüegsau	7.11	9.17	10.46	1.52	3.31	5.13	8.11	10.49
6.31	8.36	10.50	1.6	2.50	5.45	7.30	10.10	25,7	Konolfingen-Stalden 628	6.32	8.37	10.5	1.12	2.51	4.35	7.31	10.11
6.34	8.39	10.53	1.9	2.53	5.48	7.33	10.13	26,9	Stalden Dorf	6.23	8.29	9.57	1.0	2.43	4.28	7.21	10.2
6.42	8.47	11.1	1.17	3.1	5.56	7.41	10.21	30,6	Oberdiessbach	6.15	8.21	9.49	12.52	2.35	4.20	7.13	9.54
6.59	9.4	11.18	1.34	3.18	6.13	7.58	10.38	38,5	Steffisburg	5.58	8.4	9.32	12.35	2.18	4.3	6.56	9.37
°7.3	9.8	11.22	1.38	3.22	6.17	8.2	• 10.42	40,3	An Thun (Schiff) 646 a Ab	□5.53	7.59	9.27	12.30	2.13	3.58	6.51	• 9.32
7.11	9.29	11.39	...	3.30	6.28	9.11	...	41,5	An *Scherzligen* 615 b Ab	...	7.52	...	12.17	...	3.22	6.20	8.38

° Vom 1./11. bis 31./3. nur Di. u. Sb. Nur Sb. im Oktober u. April.

habe daher die Erlaubnis von der Direktion der Burgdorf-Thun-Bahn erbeten, die Versuche zu wiederholen. Mit sehr grosser Liebenswürdigkeit ist mir dies nicht nur gestattet, sondern auch in jeder Beziehung dabei Unterstützung gewährt worden.

Die Beobachtungen waren von dreierlei Art:

1. wurde ein gewöhnlicher Güterzug auf seiner Fahrt begleitet, das Manövrieren beobachtet und die Motortemperatur bestimmt;
2. wurde eine grosse Reihe von Anfahrtversuchen gemacht;
3. wurde eine normale Fahrt mit einem Zuge ausgeführt und unterwegs alle interessierenden Vorgänge, soweit Messinstrumente verfügbar waren, beobachtet.

Die Resultate zeigen die Taf. II—VIII.

123. Die Versuchsdaten sind durchweg so aufgetragen, wie sie abgelesen wurden; ich betrachte diese Versuche als Vorversuche und habe keinen Anstoss daran genommen, die Kurven in der gegebenen unregelmässigen Form abdrucken zu lassen, da sie das Resultat, auf das es im Augenblick ankommt, ohne weiteres erkennen lassen, nämlich die Übereinstimmung meiner Messungen mit denen von Prof. Wilson. Genauere Kurven hoffe ich in absehbarer Zeit mit geeignet vorbereiteten registrierenden Instrumenten aufnehmen zu können.

124. Die Temperaturmessung am Motor ergab an der dem Anfühlen nach wärmsten Stelle nach sechsundzwanzigmaligem Anfahren ohne Pause 35 ^{0} C. (nicht Erwärmung, sondern tatsächliche Temperatur), bei einem Zuge von anfänglich während 12 Anfahrten 62 t und dann 52 t, bei einem Motorgewicht von insgesamt 6 t. Die an den Motoren vorhandenen Ventilationsöffnungen waren vor den Versuchen verstopft worden.

Die Motoren der Güterzuglokomotive zeigten nach der durch den Stundenpass auf S. 74 gekennzeichneten Fahrt 17 ^{0} Übertemperatur (Gesamtmotorgewicht 8 t).[1])

125. Bei den Versuchsfahrten bot sich wiederholt Gelegenheit, die Energierückgabe an das Netz bei der Talfahrt zu beobachten (s. a. Taf. VII und VIII). Es ist in der Tat sehr reizvoll zu sehen, wie ohne jedes Zutun des Führers die Geschwindigkeit des Zuges sich stets selbsttätig in der richtigen Weise regelt, wovon der registrierende Geschwindigkeitsmesser ganz objektiv Zeugnis ablegt.

126. Diese selbsttätige Regulierung der Geschwindigkeit wird vielfach als eine Schwäche des Drehstromsystems bezeichnet; man wendet dagegen ein, dass

1. das Einholen von Verspätungen unmöglich sei,
2. der Leistungsverbrauch bei der Bergfahrt ein übermässiger werde, weil es nicht möglich sei, durch Verringerung der Geschwindigkeit bei dem erhöhten Zugwiderstand die Leistungsaufnahme in zweckmässigen Grenzen zu halten. (Mit diesem letzteren Gedanken

---

[1]) Inzwischen ist bei einem 50 t-Zug nach 82 km fahrplanmässiger Fahrt bei 4.5 t Motorgewicht eine Erwärmung von 42 ^{0} über Aussentemperatur festgestellt worden, wie ich einer brieflichen Mitteilung entnehme.

Burgdorf-Thun-Bahn. **Stundenpass für Zug No. 550.** Thun-Konolfingen-Burgdorf.

Zugpersonal: den 6. Oktober 1902.

Dienst	Namen	von	bis		No.	Personal	von	bis
Zugführer	Erismann	Thun	Burgdorf	**Motorwagen**				
Schrift	Ogg	"	"	"				
Bremser	Schüpbach	"	"	**Elektr. Lokomotive**	2	Kienle	Thun	Burgdorf
"	Wyss	Konolfingen	"	**Dampf-Lokomotive**				
				"				

Stationen	Ankunft nach dem Fahrplan	Ankunft wirklich	Abgang nach dem Fahrplan	Abgang wirklich	Kreuzungen und Überholungen nach dem Fahrplan	Kreuzungen und Überholungen wirklich	Unterschrift der Stationsvorstände	Verloren auf Station	Verloren auf Fahrt	Eingeholt auf Station	Eingeholt auf Fahrt	Belastung in Tonnen ab Station	Zahl der Achsen ab Station	Bediente Bremsen ab Station	Begründung der Verspätungen und Bezeichnung verlorener Anschlüsse
Thun			2.04	2.04	57							82	18	2	
Steffisburg	2.12	2.12	2.25	2.25	58							73	16	2	
Heimberg	2.33	2.33	2.43	2.50				7				91	18	2	
Brenzikofen	2.55	3.00	3.05	3.11	759.59			1			2	68	14	2	
Oberdiessbach	3.13	3.19	3.25	3.38				7				106	20	2	
Stalden-Dorf	3.39	3.52	3.44	4.02				5				167	28	2	
Konolfingen-Stalden	3.48	4.06	5.55	6.09	760.60					4		113	20	3	
Grosshöchstetten	6.09	6.23	6.21	6.44	61			9				105	18	3	
Biglen	6.31	6.54	6.43	7.11		63		5				193	28	3	
Walkringen	6.55	7.22	7.03	7.26	63					4		183	26	3	
Bigental	7.11	7.33	7.13	7.34						1	1	183	26	3	
Schafhausen	7.27	7.48	7.29	7.49						1	1	183	26	3	
Hasle-Rüegsau	7.38	7.57	7.43	7.59	441					3	1	183	26	3	
Oberburg	7.49	8.05	7.52	8.08								183	26	3	
Steinhof												183	26	3	
Burgdorf	8.—	8.16													

Zustand der Schienen: gut
Witterung: gut

Mitteilungen des Zugführers über den Dienstgang im allgemeinen, sowie über besondere Vorkommnisse jeder Art:

Beilagen zum Stundenpass:

Der Zugführer: **Erismann.**

kontrastiert eigentümlich die meist von derselben Seite ausgehende Behauptung, Drehstrombetrieb sei „vielleicht“ für „Bergbahnen“ geeignet.)

127. Gegen diese Bedenken wäre einzuwenden, dass in den meisten Fällen doch Einholung von kleinen Verspätungen möglich ist; man kann entweder etwas Spielraum in der Bemessung des Aufenthaltes auf der Station lassen oder beim stadtbahnartigen Betriebe durch Aufgeben der Auslaufstrecke Zeit einholen oder — wie es auf der Burgdorf-Thun-Bahn manchmal geschieht — bei der Talfahrt stromlos fahren etc.

Im Interesse der Fahrgäste liegt es andererseits, wenn gewisse Schwierigkeiten für das Einholen grösserer Verspätungen bestehen, weil ein solches Nachrennen immer etwas gefährliches an sich hat, und zwar in steigendem Mafse bei sich einführenden grösseren fahrplanmässigen Geschwindigkeiten. „Das beste Mittel, grössere Verspätungen einzuholen, ist entschieden das, sie ganz zu vermeiden.“

128. Der Mehrverbrauch an Leistung bei der Bergfahrt könnte nachteilig für die Motorerwärmung werden; für diese ist aber nicht nur die momentane Belastung massgebend, sondern auch deren Dauer. Ein mittel belasteter Motor, der einige Sekunden länger läuft als ein stark belasteter Motor, wird sich in der Endtemperatur wenig von jenem unterscheiden.

Ein anderer Nachteil der schnellen Bergfahrt läge in der Mehrbelastung der Zentrale; es werden aber Ausnahmen sein, wo diese Mehrbelastung im Vergleich zu den Verhältnissen beim Anfahren eine Rolle spielen kann. In solchen Ausnahmefällen liesse sich Abhilfe schaffen entweder durch Speisung der Bergstrecke mit niedrigem Puls oder durch Polumschaltung am Motor.

Kommen übrigens längere oder mässige Steigungen in Frage, so wird man im allgemeinen gar nicht mit stark verringerter Geschwindigkeit fahren dürfen, weil es offenbar nicht gleichgültig ist, innerhalb welcher Zeit man von A nach B kommt.[1])

129. Die selbsttätige Regulierung der Fahrgeschwindigkeit hat den grossen Vorteil, dass sie dem Fahrer grosse Erleichterung in der Ausübung seines Dienstes gewährt; der Mann kann seine volle Aufmerksamkeit der Strecke widmen und wird durch Niveauveränderungen nicht beunruhigt. Das Personal fährt deshalb erfahrungsgemäss auch lieber mit elektrischen Wagen oder Lokomotiven, als mit Dampflokomotiven. Natürlich fährt im Führerstande nur ein Mann.

130. Vielfach wird die Ansicht vertreten, dass die Unterbringung der Oberleitung bei beengtem Profil und die Ausführung der Weichen

[1]) Vergl. hierzu auch „Tischbein“, Über moderne elektrische Lokomotiven. Glasers Annalen 1900. S. 21.

unüberwindliche Schwierigkeiten bereiten müsse; um hier ein Urteil zu ermöglichen, lasse ich in Fig. 29 Grundrisse von Weichenanlagen und in Fig. 30 Darstellungen der Aufhängungen der Weichen folgen.

Diese Figuren werden noch verdeutlicht werden durch die Reproduktion einiger Photographien (Fig. 31—34, Taf. XI).[1])

131. Die Stromzuführung erfolgt bei der Burgdorf-Thun-Bahn (sowie bei anderen Bahnen, die von **Brown, Bovéri & Co.** ausgeführt worden sind) durch zwei isolierte Oberleitungen und die Fahrschienen. Bei Herstellung der elektrischen Verbindung zwischen den einzelnen Schienen wurde von den bei Strassenbahnen gebräuchlichen Kupferverbindern abgesehen und es wurde ein der Firma **Brown, Bovéri & Co.** patentiertes Verfahren angewendet.[2]) Dasselbe besteht darin, dass die Laschen zur Herstellung der leitenden Verbindung herangezogen werden. Zu diesem Behufe wurden sowohl die Schienenenden wie die Laschen an ihren Berührungsflächen sorgfältig blank geschabt und mit einer leitenden und zugleich die Oxydation verhindernden Metallpasta bestrichen, worauf die Laschen, wie üblich, mit den Schienen verschraubt wurden. Diese Verbindung bietet die grossen Vorteile, dass keinerlei vorstehende Drähte vorhanden sind, auf welche beim Krampen besonders Rücksicht genommen werden muss, und dass die Schienen bequem ausgewechselt werden können. Ausserdem ist diese Art Schienenverbinder gegen Diebstahl gesichert. Da die Laschenschrauben häufig kontrolliert und nachgezogen werden, ist von vornherein eine grosse Sicherheit vorhanden, dass die Verbindungen stets in gutem Zustande bleiben, indem etwaige Mängel sofort entdeckt werden und beseitigt werden können. Eingehende Versuche und Messungen, welche bezüglich der rostschützenden Wirkung der verwendeten Metallpasta während der Dauer eines Jahres unternommen worden sind, haben die vollständige Zuverlässigkeit des Verfahrens bewiesen.

Querverbindungen zwischen den einzelnen Schienensträngen sind in Abständen von 96 m angebracht. Dieselben bestehen aus 8 mm Kupferdraht, welcher vermittels bronzener Ösen und gleichfalls unter Verwendung der erwähnten Metallpasta an die Schienen angeschlossen ist. Ein besonderer Rückleitungsdraht ist nicht vorhanden. Die Schienenwiderstände sind vor einiger Zeit einer Prüfung unterzogen worden, über die mir folgendes Protokoll vorliegt:

Versuche über die Leitungsfähigkeit einer Schienenstossverbindung nach dem Patent Brown, Bovéri & Co., Baden. (Metallpastaverbindung.)

Schienenquerschnitt . . . . 3793 mm^2
Laschenquerschnitt . . . . 880 „

[1]) Die die Oberleitung darstellenden Linien mussten, um sie deutlicher hervortreten zu lassen, stark retouchiert werden.

[2]) Nach Schweiz. Bauzeitung am bereits genannten Ort.

Laschenlänge	454 mm
Berührungsfläche zwischen Schiene und Laschen . .	27000 qmm
Gewicht der Schiene pro lauf. Meter	29,2 kg
Gewicht einer Lasche	2900 g.

I. Widerstandsmessung für Strecke A (in kaltem Zustande)

Mittel aus 10 Messungen $W_A = 0{,}4073 \cdot 10^{-4}$ **Ohm.**

II. Widerstandsmessung für Strecke B (in kaltem Zustande)

Mittel aus 10 Messungen $W_B = 0{,}4978 \cdot 10^{-4}$ **Ohm**

$$\frac{W_B}{W_A} = \frac{0{,}4978}{0{,}4073} = 1{,}222.$$

Das Verhältnis zwischen dem wirklichen Widerstande des Schienenstranges und dem Widerstand der kontinuierlich angenommenen Schiene beträgt somit

bei 10 m langen Schienen $\frac{9 + 1{,}222}{10} = 1{,}022,$

„ 12 „ „ „ $\frac{11 + 1{,}222}{12} = 1{,}018,$

„ 15 „ „ „ $\frac{14 + 1{,}222}{15} = 1{,}015.$

Nach den Widerstandsmessungen zur Ermittelung von W_A und W_B wurde während einer Stunde ein Strom von 1000 Ampère durch die Schiene hindurch geschickt. Hierbei wurde nach einer halben Stunde W_B, nach einer Stunde W_A und W_B gemessen.

Widerstandsmessung nach einer halben Stunde

Mittel aus 10 Messungen $W'_B = 0{,}5139 \cdot 10^{-4}$ **Ohm.**

Widerstandsmessung nach einer Stunde

Mittel aus 10 Messungen $W''_A = 0{,}4209 \cdot 10^{-4}$ **Ohm,**

$W''_B = 0{,}5139 \cdot 10^{-4}$ „

$$\frac{W''_A}{W_A} = \frac{0{,}4209}{0{,}4073} = 1{,}031; \quad \frac{W'_B}{W_B} = \frac{0{,}5139}{0{,}4978} = 1{,}032.$$

Beide Widerstände W_A und W_B sind infolge der Erwärmung (Schiene leicht erwärmt) um 3,1 resp. 3,2 % grösser geworden. Eine Verschlechterung des Widerstandes des Stosses infolge Zersetzung der Metallpasta konnte nicht konstatiert werden.

132. Da es bei der Fortleitung von Wechselströmen (der Puls ist dort 42 Per. pro Sek.) nicht allein auf den ohmischen Widerstand ankommt, so vermutete ich, dass sich bei den Messungen von Strom und Spannung in den einzelnen Phasen erhebliche Ungleichheiten herausstellen würden; dies war eigentlich nicht der Fall. Folgende Tabelle (S. 78) gibt ein Beispiel einiger Ablesungen.

Mit Rücksicht auf anderweitige Erfahrungen, namentlich auch im Hinblick auf die Arbeiten von Herzog und Feldmann,[1]) möchte ich die Beobachtungen zur Beurteilung der Frage der Benutzung der Schienen als Fahrleitung noch nicht als abschliessende ansehen und mir vorbehalten, bei anderer Gelegenheit auf die Sache zurückzukommen.

Ob diese Frage grosse Bedeutung behalten wird, das hängt natürlich davon ab, ob man auch beim Übergang zu hohen Spannungen am Fahrdraht die Schienen zur Leitung mit heranziehen wird; dies ist unwahrscheinlich.

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift 1900, S. 844.

Beispiel für die Ablesungen von
Spannung und Strom der einzelnen Phasen.

Spannung			Strom		
I.—II.	II.—III.	III.—I.	I.	II.	III.
1. Bergfahrt (Höchstetten-Biglen).					
790	810	800	235	240	235
760	800	780	235	245	240
740	760	740	225	240	235
700	730	710	220	240	235
730	770	750	230	230	225
730	770	740	230	230	225
730	770	740	230	245	245
730	770	740	230	245	240
740	780	740	250	250	250
740	760	770	240	260	260
700	760	750	250	260	260
2. Thalfahrt (Biglen-Walkringen).					
840	840	860	140	145	130
820	830	825	140	150	140
810	880	815	140	150	140
840	850	860	140	135	140
830	850	840	130	130	130
820	860	840	140	140	125
840	860	850	140	145	120
840	840	850	140	155	135
820	860	830	140	145	150
840	860	850	135	145	135
840	860	850	170	140	135

133. Das Befahren der Weichen bei der Anordnung der Burgdorf-Thun-Bahn[1]) bereitet keinerlei Schwierigkeiten. Auch die in Fig. 35—39 dargestellten kürzesten Fahrzeuge der Bahn, die Güterzuglokomotiven, besitzen je 2 Bügelpaare, deren Entfernung voneinander so bemessen ist, dass auch durch die bei den Weichen unumgänglich notwendigen stromlosen Stücke in der Oberleitung eine Unterbrechung in der Stromversorgung des Fahrzeuges nie hervorgerufen wird; das Anfahren auf der Weiche, das beim Manövrieren der Güterzüge fortwährend nötig ist, bereitet daher keinerlei Schwierigkeit.

134. Auch bei anderen Anordnungen — z. B. bei drei isolierten Fahrdrähten nach dem System von Siemens & Halske[2]) (Fig. 40—42, Taf. XIV) — lassen sich wohl Lösungen finden, die ein Befahren der

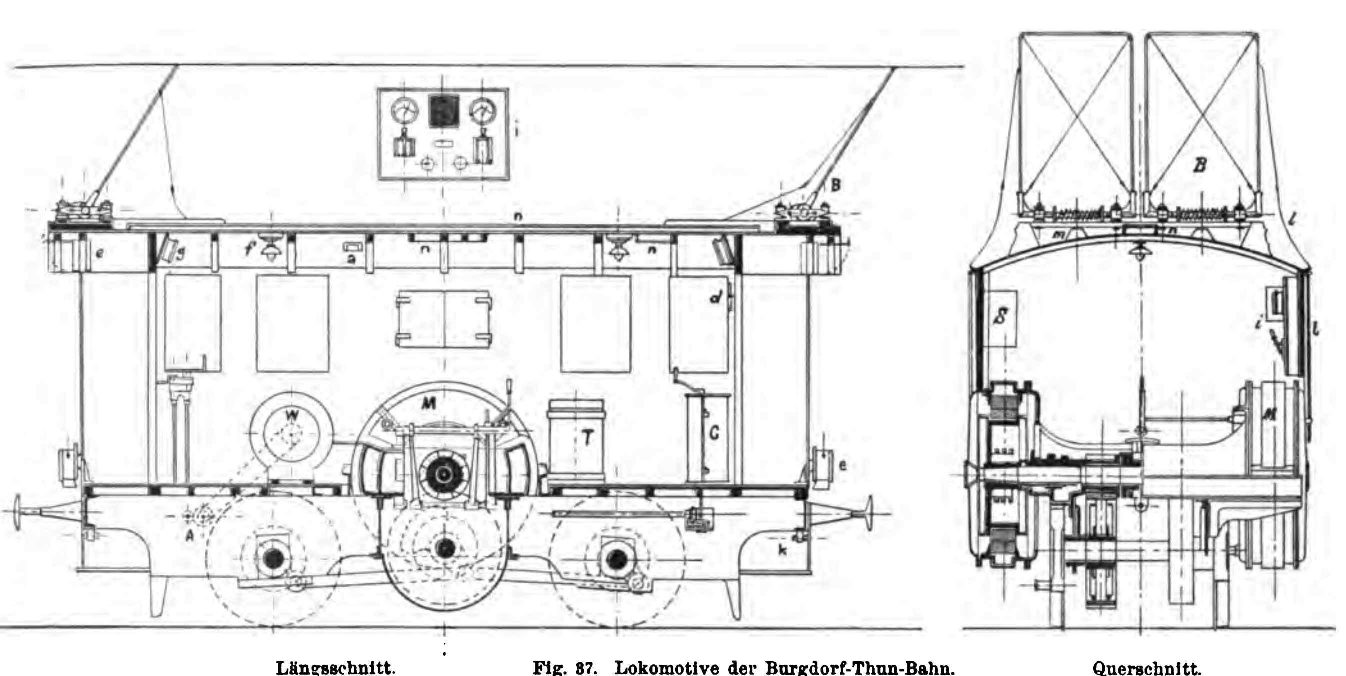
[1]) Nach den Patenten von Brown, Bovéri & Co.

[2]) Oberleitung der bekannten Versuchsstrecke für elektrische Schnellbahnen Marienfelde-Zossen nach einem von Siemens & Halske freundlichst zur Verfügung gestellten Bilde.

Achsenzahl 2.
Radstand 3,14 m.
Länge zwischen den Puffern 7,8 m.
Zahl der Motoren 2.

Leistung pro Motor 150 PS.
Drehzahl der Motoren 800.
Übersetzungen (auswechselbar) 1 : 1,86 und 1 : 3,72.
Triebraddurchmesser 1230 mm.

Dienstgewicht } 29,6 t.
Adhäsionsgewicht } 29,6 t.
Gewicht pro Motor 4 t.
Gewicht der elektrischen Ausrüstung 10 t.



Längsschnitt. Fig. 87. Lokomotive der Burgdorf-Thun-Bahn. Querschnitt.

M 2 Motoren zu je 150 PS; *W* 1 Widerstand zum Regulieren; *C* 2 Fahrschalter; *B* 4 Stromabnehmerbügel; *T* 1 Transformator, 18 Kw für Beleuchtung und Antrieb des Kompressors; *S* Kasten für Schmelzsicherungen; *A* Antrieb des Stufenschalters am Regulierwiederstand; *a* Blitzschutz; *b* Kompressor für die Luftdruckbremse; *c* Schalter dazu (selbsttätig); *d* Handschalter zum Kompressor; *e* Signallichter; *f* Lampen; *g* Hauptstromzeiger; *i* Schaltbrett, enthaltend Messinstrumente, Lichtschalter u. dergl.; *k* Steckkontakte für Anschluss von Lichtleitungen für Anhänger; *l* Handhabe zur Bedienung der Bügel; *m* Arretiervorrichtung für Bügel; *n* Leitungskanäle.

Weichen gestatten, doch ist es noch nicht möglich, hierüber Einzelheiten anzugeben.

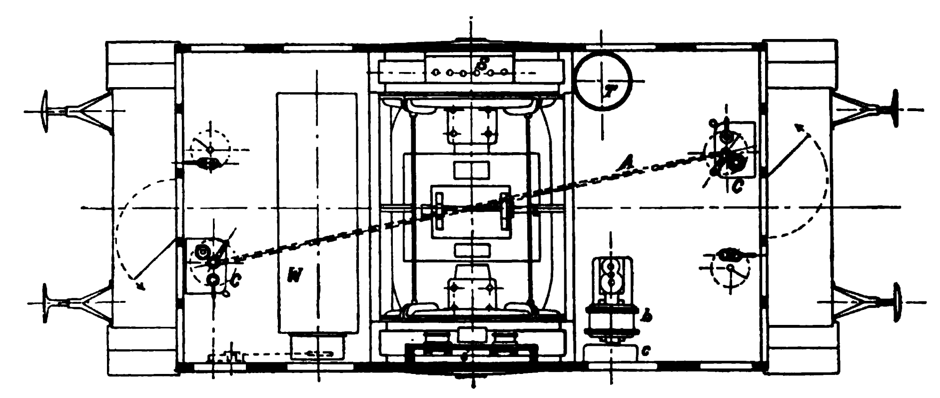


Fig. 88. Lokomotive (Grundriss).

135. Die Leitung ist aber doch derjenige Teil des Ganzen, der dem Konstrukteur das lohnendste Arbeitsgebiet lässt. Zufälle sonderbarster Art können hier Störungen verursachen. Aus den Geschäftsberichten der Burgdorf-Thun-Bahn entnehme ich dem Jahrgang 1900 z. B. folgende Angaben:

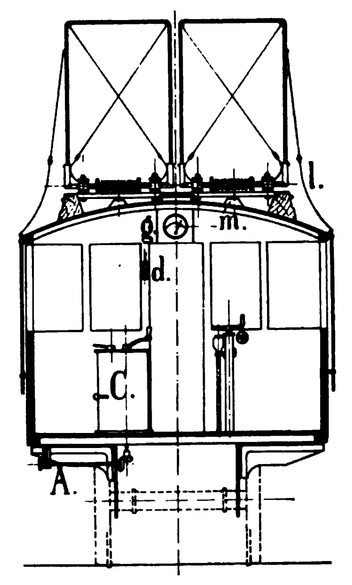


Fig. 89. Führerstand.

„Die aus der Eigenart des elektrischen Betriebes resultierenden Störungen haben im Berichtsjahre wesentlich abgenommen,[1]) was den angebrachten Verbesserungen, sowie der sicheren Bedienung des nun eingeschulten Personals unserer Verwaltung und des Kanderwerkes zugeschrieben werden darf. Wenn wir die Störungen im Zugverkehr gruppieren, so ergeben sich folgende Resultate:

a) Primärleitung:

3 Verspätungen von 24—60 Minuten infolge Bruch von Hochspannungs-Isolatoren,

[1]) Während der Drucklegung dieses Buches erhielt Verfasser ferner eine amtliche Statistik über die auf den schweizerischen Bahnen im Monat Oktober 1902 beförderten Züge und deren Verspätungen, der zu entnehmen ist, dass auf die Gesamtzahl der Züge der Burgdorf-Thun-Bahn 0,7 % Verspätungen kommen. Die ebenfalls mit Drehstrom betriebene Bahn Stansstadt-Engelberg hatte 0,13 % Verspätungen. Diese ziemlich günstigen Werte sind insofern bemerkenswert, als andere Strecken, die Dampfbetrieb haben, teilweise bedeutend schlechtere Zahlen zu verzeichnen haben und von 0,3 % beginnend

eine Verspätung von 3 Stunden infolge einer durch den Sturmwind auf die Leitung geworfenen Tanne,

mehrere kleinere und eine grössere Verspätung (85 Minuten) infolge von Gewittern,

eine Verspätung von einer Stunde wegen Mangel an der Rohrleitung im Kanderwerk,

eine Anzahl kleinerer Verspätungen wegen zu tief gehaltener Spannung.

b) Transformatorenstationen:

mehrere kleinere und eine grössere Verspätung infolge Schmelzen der Sicherungen,

drei Verspätungen von 16—35 Minuten wegen Blitzschlag.

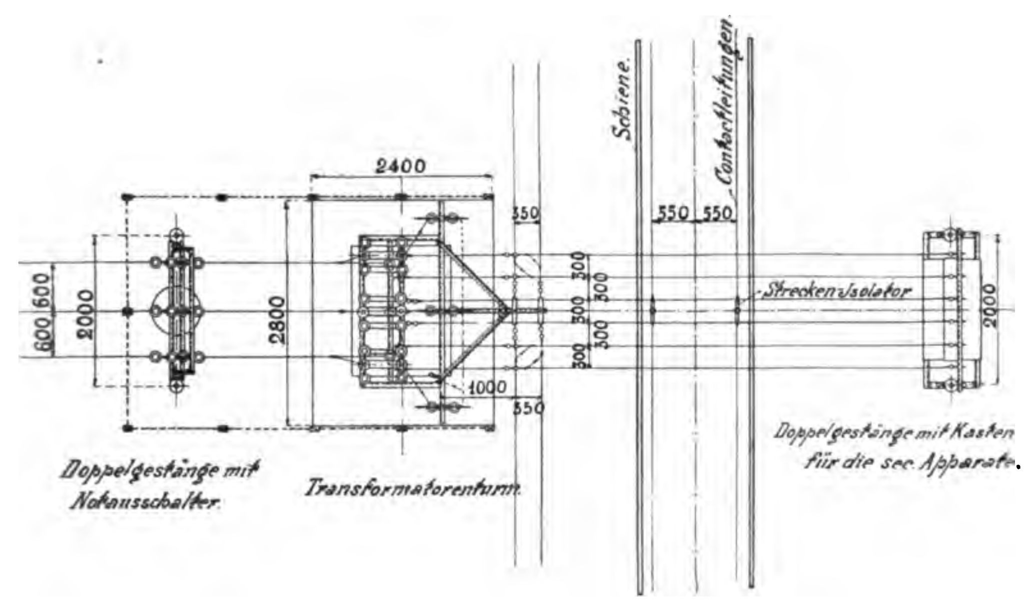


Fig. 48. Streckenausrüstung der Burgdorf-Thun-Bahn. — Schaltung der Transformatoren.

c) Kontaktleitung:

1. Drahtbrüche:

zwei Verspätungen von 33 und 146 Minuten infolge Bruchs des Kontaktleitungsdrahtes,

vier kleinere Verspätungen wegen Herunterfallen von Queraufhängungen;

2. Bruch von Streckenisolatoren:

fünf Verspätungen, wovon nur eine von Belang (23 Minuten);

bei den vollspurigen Bahnen bis 4,7 %, bei den schmalspurigen Bahnen bis 5,16 % kommen. Die beiden grössten Linien haben 2,53 und 3,18 % Verspätungen gehabt.

Die Freiburg-Murten-Bahn ist hier, weil im Umbau befindlich, nicht berücksichtigt worden.

3. Reif- und Eisbildung an der Kontaktleitung:
eine grössere (60 Min.) und mehrere kleinere Verspätungen.

Wir bemerken noch, dass die Blitzschläge, welche zu verschiedenen Malen in die Kontaktleitung und die Transformatorenstationen stattfanden, keinen nennenswerten Schaden angerichtet haben. Die Transformatoren wurden jeweilen ausgewechselt und in der Werkstatt untersucht; dabei zeigte sich in keinem Falle eine Beschädigung."

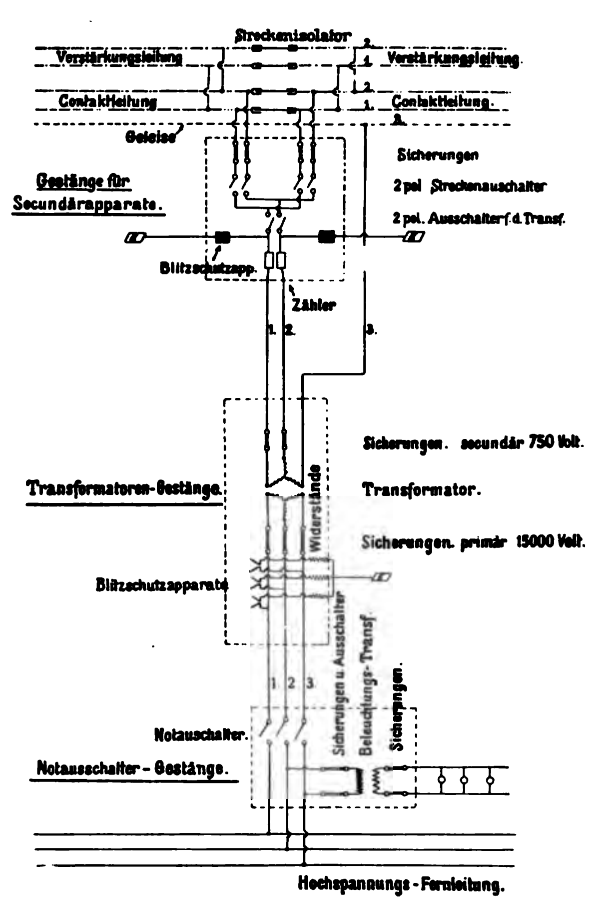


Fig. 49.

136. Einige der Blitzschutzvorrichtungen sind auf Fig. 45 in Gestalt der bekannten Hörnerblitzableiter zu sehen. Die Figur stellt im übrigen eine Transformatorenstation dar, in der der aus der Zentrale (dem Kanderwerk am Thuner See) kommende Hochspannungsstrom von 15000 Volt auf die — nur mit Rücksicht auf behördliche Vorschriften so niedrig gewählte — Gebrauchsspannung am Fahrdraht von 850 Volt heruntergesetzt wird.

137. Mit jeder Transformatorenstation ist, wie Fig. 44, 46, 48 u. 49 zeigen, ein Speisepunktausschalter verbunden. Um auf alle Fälle gefasst zu sein, hat die Bahn einen besonderen Montagewagen für die Pflege der Oberleitung und für etwaige Auswechslung der Transformatoren (Fig. 50) angeschafft, mit dessen Hilfe in 20 Minuten eine Auswechslung vorgenommen werden kann.

Natürlich sind prophylaktische Massregeln bei der Pflege der Leitung ebenso notwendig, wie bei der Pflege der Gleise, wenn man Betriebsstörungen vermeiden will. Die Bahn lässt daher durch Bahnwärter, Streckenarbeiter u. s. w. regelmässig Revisionen vornehmen, über die nach nachstehendem Vordruck Bericht erstattet wird.

Wenn Transformatoren ausgeschaltet werden müssen, bei allen Zügen den Führern Mitteilung machen!

Burgdorf-Thun-Bahn.

Wöchentliche Revision der Transformatorenstation No. ....

vom .... 190 .....

1. Brummen der Transformatoren:
Ist dasselbe schwach, stark oder sehr stark? . . . .

2. Notausschalter:
a) Spielt der Antrieb gut? . . . .
b) Machen alle Messer Kontakt? . . . .

3. Blitzschutzapparate 15000 und 750 Volt:
a) Sind sie in Ordnung? . . . .
b) Hat seit der letzten Revision eine Entladung stattgefunden? ....
c) Sind Tonrohre alle ganz? . . . .
d) Ist kein Öl oder Wasser ausgeflossen? . . . .

4. Isolatoren und Querleitungen:
a) Sind an dem Notgestänge und Transformatorenturm keine gesprungenen Isolatoren bemerkbar? . . . .
b) Sind die Querleitungen in Ordnung? . . . .

5. Einführungen z. Transformatorenturm und Sekundärkasten:
a) Ist seit der letzten Revision nirgends der Strom übergesprungen? ....
b) Sind keine Funken ersichtlich, wenn eingeschaltet ist? . . ..
c) Sind an den Einführungen keine Risse bemerkbar? . . . .

6. Einführungen zum Bahntransformator:
a) Ist seit der letzten Revision nichts Auffallendes bemerkbar? . ...
b) Sind keine Risse vorhanden? . . . .
c) Sind keine Funken bemerkbar, wenn eingeschaltet ist? . . . .
d) Sind innen im Ölkasten die Einführungen noch ganz? . . . .

7. Sicherungen und Ausschalter:
a) Sind die Kontakte noch gut? . . . .
b) Ist sonst nichts zu bemerken? . . . .

8. Erwärmung des Transformators:
Ist dieselbe schwach, stark oder sehr stark, stark kann mit der Innenfläche der Hand ca. 5 Sekunden ertragen werden, oben am Ölkasten gemessen? . . . .

Bei Streckenausschaltungen mit roter Fahne oder rotem Licht die ausgeschalteten Strecken decken!

Beim Auswechseln der Sicherungen, bei Ausschaltungen u. s. w. weit abstehen, eine Hand in der Tasche.

Bei den Revisionen, Ausschaltungen und dem Auswechseln der Sicherungen die Gummihandschuhe anlegen.

9. Ölstand im Ölkasten	Abstand vom Zinkdeckel bis zur Öloberfläche ..... cm.
10. Ausrüstungen: Reservesicherungen, Leiter, Schlüssel.	Anz. d. Reserve-Sicherungspatr. 15000 Volt f. d. Bltransf. ....
a) Ist alles komplett?	„ „ „ 750 „ „ „ „ ....
b) Sind alle roten Sicherungen im Kasten u. mit Patronen versehen?	....
c) Sind Gummihandschuhe noch brauchbar?	....
d) Funktioniert das Prüfungsläutewerk noch?	....
11. Erdleitungen. Sind keine Defekte bemerkbar:	
a) Zum Antrieb des Notausschalters?	....
b) Zur Schienenleitung?	....
c) Zum Transformator?	....
d) Zum Sekundärkasten?	....
e) Zu den Blitzschutzapparaten 15000 und 750 Volt? . . .	....
12. Allgemeines:	
Anstrich, sonstige Unregelmässigkeiten?	....
13. Licht-Transformatoren:	
a) Ist das Brummen normal?	....
b) Sind keine Defekte an den Einführungen, Sicherungen, Isolatoren oder Blitzschutzapparaten 15000 Volt bemerkbar? .	....
c) Ist kein Öl ausgeflossen?	....
14. Kontaktleitungen auf der Station:	
a) Drohen auf Stationsgeb. keine Kontaktleitungstang. umzufallen?	....
b) Sind die Kontaktleitungen nicht zu tief, können die Bügel der Motorwagen noch gekehrt werden?	....
c) Sind an den Weichen keine Funkenerscheinungen bemerkbar?	....
d) Sind bei den Weichen und Streckenisolatoren keine Stromzuführungen los?	....
e) Ist sonst nichts zu bemerken?	....

Diese wöchentlichen Revisionen sind jeweilen Freitags von dem Stationsvorstand oder Vorstandsstellvertreter und 1 Mann gehörig vorzunehmen und die ausgefüllten Formulare mit den letzten Zügen dem Depotchef einzusenden.

Solche Revisionen sind ausserdem nach jeder „Störung an den Kontaktleitungen, Transformatorenstationen, Hochspannungs- oder Kontaktleitungen“ vorzunehmen, sowie nach jedem Steckenbleiben eines Zuges.

In Burgdorf und Thun werden diese Revisionen von dem Reserveführer und 1 Mann ausgeführt.

Den Stationsvorständen Bigenthal und Brenzikofen, sowie dem Bahnwärter km 17^{503} wird zur Ausführung der Revisionen 1 Mann beigegeben.

Vorliegende Revision ausgeführt von { 1 ....
2. ....

Bei starken Gewittern, soweit es der Betrieb gestattet, die Transformatorenstationen ausschalten.

Bei Ausschaltungen Strom immer durch den Hochspannungs-Ausschalter unterbrechen und wieder schliessen.

138. Um einen Wagen für Arbeiten irgendwelcher Art oder in Fällen dringender Gefahr stromlos machen zu können, sind die zur Stromabnahme dienenden Doppelbügel mit langen, durch Hanfseile mit den Bügeln verknüpften Handgriffen versehen, die ein Abziehen oder Anlegen der Stromabnehmer mit Leichtigkeit gestatten, wie Fig. 52 zeigt.

(Die Stromabnehmer übertragen jeder bis 125 Ampère und mehr; sie bestehen aus in Dreiecksform gepressten Metallröhren, der Anlagedruck wird nach Angabe einer Federwage genau eingestellt und beträgt ca. 2 kg. Im Winter wird der Anlagedruck etwas erhöht, um eine leichtere Beseitigung des Rauhreifs zu gestatten. Die Oberleitung wird von Zeit zu Zeit durch eine besondere Vorrichtung am Montagewagen mit Fett geschmiert.)

139. Die Beleuchtung[1]) der Wagen erfolgt unter Vermittelung eines kleinen Transformators vom Fahrdraht aus; das ist eine Anordnung, die man bei Einführung elektrischer Zugförderung im grossen aufgeben sollte,[2]) weil ein Dunkelwerden des Wageninneren beim Ausbleiben des Stromes aus irgendwelchen Gründen bedenklich ist.

Die Stationen und das Depot werden vom Kanderwerk her beleuchtet, wobei ein kleiner Transformator die Spannung auf 110 Volt ermässigt (Fig. 51, Taf. XVI).

140. Die Kompressoren für die Luftdruckbremsen (deren pneumatischer Teil übrigens anfänglich die Quelle von unangenehmen Störungen bildete, die erst nach dem Umbau durch eine schweizerische Firma behoben wurden) werden von 1 PS Drehstrommotoren mit Kurzschlussanker angetrieben, die vom Lichttransformator des Wagens aus gespeist werden.

141. Die Regulierwiderstände (Fig. 54 u. 55) und die Sicherungen (Fig. 56) liegen unten am Wagen. Nach dreijährigem Gebrauch fand ich diese Apparate in bestem Zustande, so dass man hätte annehmen können, sie wären am Tage vorher eingebaut worden.

(Fortsetzung des Textes s. S. 92.)

---

[1]) Hierfür gibt der „Dienstfahrplan" der B.T.B.-Bahn folgende Vorschrift: Die Beleuchtung und die Beheizung der Personenwagen erfolgt auf elektrischem Wege. Die Handhabung der betreffenden Einrichtungen ist im Abschnitt IV der „Vorschriften über die elektrischen Anlagen und Einrichtungen" beschrieben; über dieselbe wird im übrigen der Depotchef die nötige mündliche Anleitung geben.

In Bezug auf Beginn und Schluss der Wagenheizung und die Ausdehnung der letzteren gelten folgende Normen:

Die Personenzüge sind jedenfalls von Anfang Oktober bis Ende April zu heizen, sobald die äussere Temperatur unter 5° C. sinkt. Vom 1. Dezember bis Ende Februar ist die Heizung ohne Rücksicht auf die Temperatur ununterbrochen durchzuführen und es darf damit nur dann aufgehört werden, wenn während dreier aufeinanderfolgender Tage und Nächte die Temperatur des Nachts nicht unter 5° C. gesunken ist.

Während der Fahrt soll die Temperatur in den Wagen mindestens 10° und höchstens 18° C. betragen; die normale Temperatur beträgt 14—15° C.

[2]) Vergl. hierzu Kübler-Schimpff, Elektrischer Betrieb der Wannseebahn. Zeitschr. des Vereins zur Förderung des Gewerbefleisses. Berlin, L. Simion, 1898.

Stand und Beschreibung des Rollmaterials der Burgdorf-Thun-Bahn 1901.

		Bestand:
Dampflokomotive (Tendermaschine)[1]		1
Motorenwagen: a) elektrische Lokomotiven		2
b) Automobile		6
Leistungsfähigkeit: a) der Dampflokomotive	Pferdestärken	318
b) „ elektrischen Lokomotiven	„	600
c) „ Automobile (Motorwagen)	„	1440
im ganzen	„	**2358**
pro Bahnkilometer	„	57,5
Adhäsionsgewicht: a) der Dampflokomotive	Tonnen	49,6
b) „ elektrischen Lokomotiven	„	60
c) „ Automobile	„	192
im ganzen	„	**301**,6
Personenwagen (amerikanisches System).		
Anzahl Wagen im ganzen		**16**
mit 2 Achsen		10
„ 4 „		6
Anzahl Achsen im ganzen		**44**
pro Wagen		2,75
„ Bahnkilometer		1,07
Anzahl Plätze II. Klasse		152
III. „		658
im ganzen		**810**
pro Wagenachse		18,4
„ Bahnkilometer		19,8
Eigengewicht der Wagen im ganzen	Tonnen	**314**,6
pro Wagenachse	„	7,15
„ Sitzplatz	„	0,388
Lastwagen (2achsig).		
Anzahl gedeckte Güterwagen		55
offene „		12
Wagen im ganzen		**67**
Anzahl Achsen im ganzen		**134**
pro Wagen		2,00
„ Bahnkilometer		3,3
Tragkraft im ganzen	Tonnen	**867**,5
pro Achse	„	6,5
„ Bahnkilometer	„	21,1
Eigengewicht der Wagen im ganzen	„	**576**,6
pro Achse	„	4,3
„ Tonne Tragkraft	„	0,7
Innere Dimensionen: Länge	Meter	6,52—8,31
Breite	„	2,69—2,78
Höhe der gedeckten Wagen	„	2,20—2,25

[1]) Diese Maschine wurde in der ersten Zeit für die Beförderung des Güterzuges benutzt, steht jetzt aber nur noch in einer Art von Reserve. Im Dienst ist sie durch die elektrischen Lokomotiven abgelöst worden, denen nunmehr die Beförderung der Güterzüge obliegt.

Dampf-Lokomotiven.

Serie	Serienbezeichnung	Nummern	Anzahl	Jahr der Inbetriebsetzung: der Maschine	Jahr der Inbetriebsetzung: des Kessels	Triebrad-Durchmesser mm	Zylinder: Durchmesser mm	Zylinder: Kolbenhub mm	Zylinder: Disposition	Kesselverhältnisse: max. Überdruck in Atm.	Heizfläche wasserberührt: direkt m²	Heizfläche wasserberührt: total m²	Siederohre: Länge m	Siederohre: Anzahl	Rostfläche m²
Tender-Lokomotive (Compound) mit 4 gekuppelten Achsen und einer Laufachse für Nebenbahnen .	E⁴	6	1	1899	1899	1230	{480 {700	600	Aussen-Neigung 1 : 40	12	7,6	113,1	3,8	196	1,7

Serie	Gewichtsverhältnisse: total Gewicht voll ausgerüstet Tonnen	Maschine: ganz leer Tonnen	Maschine: dienstbereit voll Tonnen	Maschine: Adhäsionsgewicht Max. Tonnen	Maschine: Adhäsionsgewicht Min. Tonnen	Tender: leer Tonnen	Tender: Fassung Speisewasser m³	Tender: Fassung Brennmaterial Tonnen	Grösste Dimensionen: Länge inkl. Puffer m	Grösste Dimensionen: Höhe mit Kamin m	Radstand: fest m	Radstand total: exkl. Tender m	Radstand total: inkl. Tender m	Maximale Geschwindigkeit km	Lieferant der Maschinen	Bemerkungen.
Fortsetzung	50,7	39,0	50,0	44,0	37,2	—	5,3	1,5	10,3	4,215	4,10	6,43	—	50	Lokomotivfabrik Winterthur	Westinghouse- u. Exterbremsen. Einrichtung für Dampfheizung.

Motorenwagen.

Serie	Serienbezeichnung	Nummern	Anzahl	Datum der Inbetriebsetzung	Triebrad-Durchmesser mm	Antriebsmotoren (Drehstrom, Puls 40) Anzahl	PS pro Motor	total PS	Mittlere Spannung Volt	Maximal-Stromstärke pro Motor
Elektr. Lokomotiven mit 2 gekuppelten Achsen u. 2 Führerständen	E 2 E	1—2	2	August 1899	1200	2	150	300	750	150
Automobile mit zwei Drehgestellen und 2 Führerständen .	BC 4	1—6	6	Juli 1899	1000	4	50—60	240	750	60

	Art des Antriebes	Kompressor für Westinghousebremse und Signalpfeife	Transformator für elektrische Heizung und Beleuchtung und Kompressormotor	Stromabnehmer	Gewicht Tonnen
Fortsetzung Serie E 2 E	Die auf gleicher Welle gekuppelten Motoren treiben mit zwei verschied. Übersetzungsverhältnissen (18 oder 36 km) eine Kurbelwelle an, von welcher aus vermittelst Kurbeln der Antrieb der Triebachsen erfolgt.	1 Drehstrommotor à 4 PS 100 Volt, Puls 40. Max. 30 Amp.	Leistung 18 Kw Verhältnis 750/100 Volt	2 Paar Bügel von 1,100 m Breite und 1,500 m Höhe	30
Fortsetzung Serie BC 4	Je 1 Motor treibt vermittelst Zahnradübersetzung eine der vier Triebachsen an.	„	„	„	32

	Dimensionen Länge inkl. Puffer m	Höhe exkl. Bügel m	Radstand m	Maximale Geschwindigkeit km	Lieferant der Motorenwagen	Bemerkungen.
Fortsetzung Serie E 2 E	7,800	3,800	3,150	40	Lokomotivfabrik Winterthur und Brown, Bovéri & Co. in Baden.	Westinghouse- u. Schraubenbremse. Elektr. Heizung und Beleuchtung.
Fortsetzung Serie BC 4	16,200	3,800	9,500	40	Schweiz. Industrieges. Neuhausen und Brown, Bovéri & Co. in Baden.	Westinghouse- u. Schraubenbremse. Elektr. Heizung und Beleuchtung.

Personenwagen.

Serie	Serienbezeichnung	Nummern	Anzahl	Jahr der Inbetriebsetzung	Tara pro Wagen kg	Tara pro Sitzplatz kg	Sitzplätze pro Wagen II. Klasse	Sitzplätze pro Wagen III. Klasse	Sitzplätze pro Wagen Total	Totaler Radstand m	Länge inklusive Puffer m	Heizapparate	Beleuchtung	Bremsen	Bemerkungen.
4 achs. Pers.-Wagen II. u. III. Kl.	BC[4]	1—6	6	1899	31 930	483,8	16	50	66	9,500	16,300	Elektrische Heizung	Elektr. Licht	Westinghouse- u. Schraubenbremse	
2 „ „ „ II. Klasse	B	20	1	1899	9 800	408,3	24	—	24	4,800	8,700	Elektrische und Dampfheizung	„	„	
2 „ „ „ II. u. III. Kl.	BC[2]	15—16	2	1899	14 000	254,5	16	39	55	8,000	13,500	„	„	„	
2 „ „ „ III. Klasse	C[2]	30—31	2	1899	13 200	188,5	—	70	70	8,000	13,500	„	„	„	
2 „ „ „ III. Klasse	C	35—36	2	1899	9 650	241,2	—	40	40	4,800	8,700	„	„	„	
2 „ „ „ III. Klasse	CFZ	40—42	3	1899	13 200	660,0	—	20	20	8,000	13,500	„	„	„	Mit Gepäck- und Postraum.
		Total	16												

Güterwagen.

Serie	Serienbezeichnung	Nummern	Anzahl	Jahr der Inbetriebsetzung	Tara kg	Tragkraft kg	Innere Dimensionen: Länge m	Breite m	Höhe m	Freie Bodenfläche m²	Laderaum des gedeckt. Wagens m³	Totaler Radstand m	Länge inkl. Puffer m	Bremsen	Bemerkungen.
(Reformwagen), Wagen mit über 16 m² Bodenfläche, für Güter- und Viehtransport geeignet, mit einer Tragfähigkeit über 10 bis 13 Tonnen	G R 1	51—60	10	1897	8800	12,500	6,720	2,720	2,200	18,27	40,21	5,000	8,300	Schrauben- und Westinghousebremse.	Mit Bremsplattform und Dampfleitung.
Gedeckte Güter- und Viehwagen, allgemein verwendbar, über 16 m² Bodenfläche und 10 bis 13 Tonnen Tragkraft . . .	K R 1	101—145	45	1898	8790	12,500	6,520	2,720	2,250	17,73	40,00	4,400	8,300	Schraubenbremse.	Bremshütte auf d. Plattform.
Offene Güterwagen mit Wandhöhen bis 60 cm, über 16 m² Bodenfläche, allgemein verwendbar, bis 15 Tonnen Tragkraft . .	M R 2	401—412	12	1898	7760	15,000	8,310	2,690	0,300	22,35	—	5,000	10,000	Schraubenbremse.	Bremshütte an der Stirnwand. Stirnwände fest Seitenwände m. Scharnier zum Umlegen nach unten. Hölzerne Bodenrippen.
		Total	67												

Leistungen des Rollmaterials.[1])

Parcours des eigenen und fremden Materials auf eigener und fremder Bahn.

a) Dampf-Lokomotiven und elektrische Motorenwagen.

		Auf eigener Bahn	Auf schweiz. Bahnen	Auf ausländ. Bahnen	Im ganzen
Dampf-Lokomotiven:[2])		Zurückgelegte Kilometer der Dampf-Lokomotiven und elektr. Motorenwagen			
Eigene Lokomotive:	Nutzdienst . . .	2 677	5	—	2 682
	Materialzüge . .	—	—	—	—
	Leerfahrten . .	2 566	5	—	2 571
	Rangierdienst[3])	33	7	—	40
	Zusammen	**5 276**	**17**	—	**5 293**
Fremde Lokomotiven:	Nutzdienst . . .	805	—	—	805
	Materialzüge . .	190	—	—	190
	Leerfahrten . .	566	—	—	566
	Rangierdienst[3])	5 401	—	—	5 401
	Zusammen	**6 962**	—	—	**6 962**
Elektrische Motorenwagen:					
A. Lokomotiven:	Nutzdienst . . .	46 408	—	—	46 408
	Materialzüge . .	14	—	—	14
	Leerfahrten . .	748	—	—	748
	Rangierdienst[3])	348	—	—	348
	Zusammen	**47 518**	—	—	**47 518**
	Durchschnitt pro Lokomotive	23 759	—	—	23 759
B. Automobile:	Nutzdienst . . .	252 465	—	—	252 465
	Materialzüge . .	201	—	—	201
	Leerfahrten . .	1 362	—	—	1 362
	Zusammen	**254 028**	—	—	**254 028**
	Durchschnitt pro Automobil	42 338	—	—	42 338
Dampflokomotiven und Motorenwagen zusammen		**313 784**	**34**	—	**313 818**

[1]) Im letzten Betriebsjahr.

[2]) Aus der gleichzeitigen Befahrung der Strecke mit elektrischen und Dampflokomotiven haben sich im allgemeinen Schwierigkeiten nicht ergeben. In einem Falle nur verursachte die Dampflokomotive dadurch eine Störung, dass sie gerade mit dem Schornstein unter einem Ambroinisolator hielt und diesen durch übermässige Erwärmung beschädigte. Ersatz des Ambroins durch Porzellan gestattet leicht den Ausschluss solcher Vorkommnisse.

[3]) 1 Rangierstunde = 6 Lokomotivkilometer.

Leistungen des Rollmaterials.[1])

Parcours des eigenen und fremden Materials auf eigener und fremder Bahn.

b) Personen-, kombinierte und Lastwagen.

	Auf eigener Bahn	Auf schweiz. Bahnen	Auf ausländ. Bahnen	Im ganzen
Personenwagen:	Zurückgelegte Achsenkilometer			
Automobile a) als Traktionsmittel	1 016 112	—	—	1 016 112
Automobile b) als Anhängewagen	7 928	—	—	7 928
Durchschnitt pro Achse	42 668	—	—	42 668
Anhängewagen	70 630	1 204	—	71 834
Durchschnitt pro Achse	5 045	86	—	5 131
Fremde Personenwagen	10 050	—	—	10 050
Total	**1 104 720**	**1 204**	—	**1 105 924**
Kombinierte Personen-, Gepäck- und Postwagen:	**240 890**	—	—	**240 890**
Durchschnitt pro Achse	40 148	—	—	40 148
Lastwagen:				
Eigene Güterwagen	161 510	1 290 166	261 752	1 713 428
Schweizerische Güterwagen	690 564	—	—	—
Ausländische „	84 507	—	—	—
Alle Lastwagen zusammen	**936 581**	—	—	—
Eigene Lastwagen, Durchschnitt pro Achse	1 170	9 349	1 897	12 416
Alle Wagen überhaupt (inkl. Personenwagen)	**2 282 191**	—	—	—

142. Das gleiche gilt vom Fahrschalter, den Fig. 57 darstellt.

Bei der Schonung des Schaltermaterials ist es von nicht unwesentlicher Bedeutung, dass Wechselstrom an sich viel geringeres „Feuer“ an den Kontakten verursacht, als Gleichstrom; bei Drehstrom kommt weiter als günstiges Moment hinzu, dass die Energiezufuhr an drei Stellen und nicht an zwei Stellen unterbrochen wird und zwar, infolge der eigentümlichen Schaltung des Anlassers beim Drehstrommotor, immer bei verhältnismässig niedriger Stromstärke.

Fahrschalter und Anlasser sind durch eine Kette mechanisch verbunden.

143. Über das Betriebsmaterial und die Betriebsleistungen der Bahn geben die Tabellen S. 86—92 Auskunft, die dem Geschäftsberichte der Direktion für das Jahr 1901 mit deren frdl. Zustimmung entnommen sind.

[1]) Im letzten Betriebsjahr.

Neunter Abschnitt.

144. Während die Burgdorf-Thun-Bahn in mehrjährigem praktischen Betriebe die Lebensfähigkeit einer Drehstrombahn in glänzendster Weise dargetan hat, haben die von Berlin aus auf Grund der bahnbrechenden Vorarbeiten von Siemens & Halske in Lichterfelde[1]) angeregten Versuche mit elektrischem Schnellbahnbetrieb auf der Strecke Marienfelde-Zossen eine Reihe konstruktiver Arbeiten von hervorragender Bedeutung geschaffen. Es wird berechtigt sein, an diese hier kurz zu erinnern.

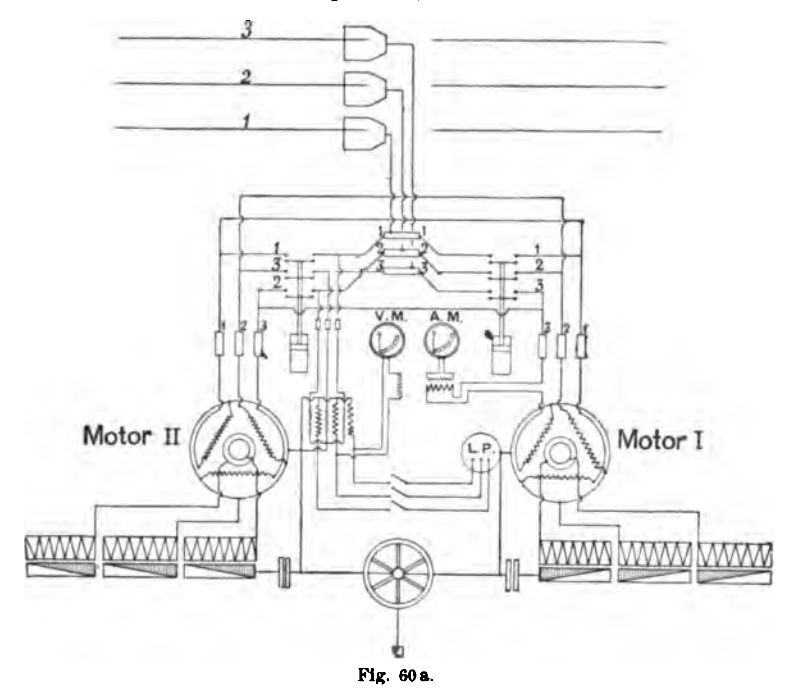


Fig. 60a.

Die Fig. 40—43 haben bereits ein Bild der Streckenausrüstung gegeben; denjenigen der Motorwagen der Schnellbahn, den Siemens & Halske[2]) gebaut haben, zeigt Fig. 58, eins der Drehgestelle zu demselben Fig. 59, den Anlasswiderstand, seine Ausführung und Schaltung Fig. 60 u. 60a, den Führerstand Fig. 61.

145. Teile der Motoren sind durch Fig. 62 u. 62a veranschaulicht. Den zweiten Wagen der Studiengesellschaft für Fernschnellbahnen hat bekanntlich die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft gebaut; die Darstellung der Konstruktionsdetails für diesen würde nicht sehr viel grundsätzlich anderes bieten, wenigstens nicht zum vorliegenden Thema, so dass ich

[1]) Reichel, E. T. Z. 1900, Heft 23.

[2]) Einen zweiten Wagen baute die A. E.-G.

zunächst auf deren Wiedergabe, der Raumnot mich fügend, verzichten zu dürfen glaube. Fig. 63 u. 64 geben Bilder von den 10000-Voltmotoren der von Siemens & Halske zuletzt gebauten Drehstromlokomotive (Fig. 67); die konstruktive Anordnung ist besser ersichtlich aus Fig. 65 u. 66;

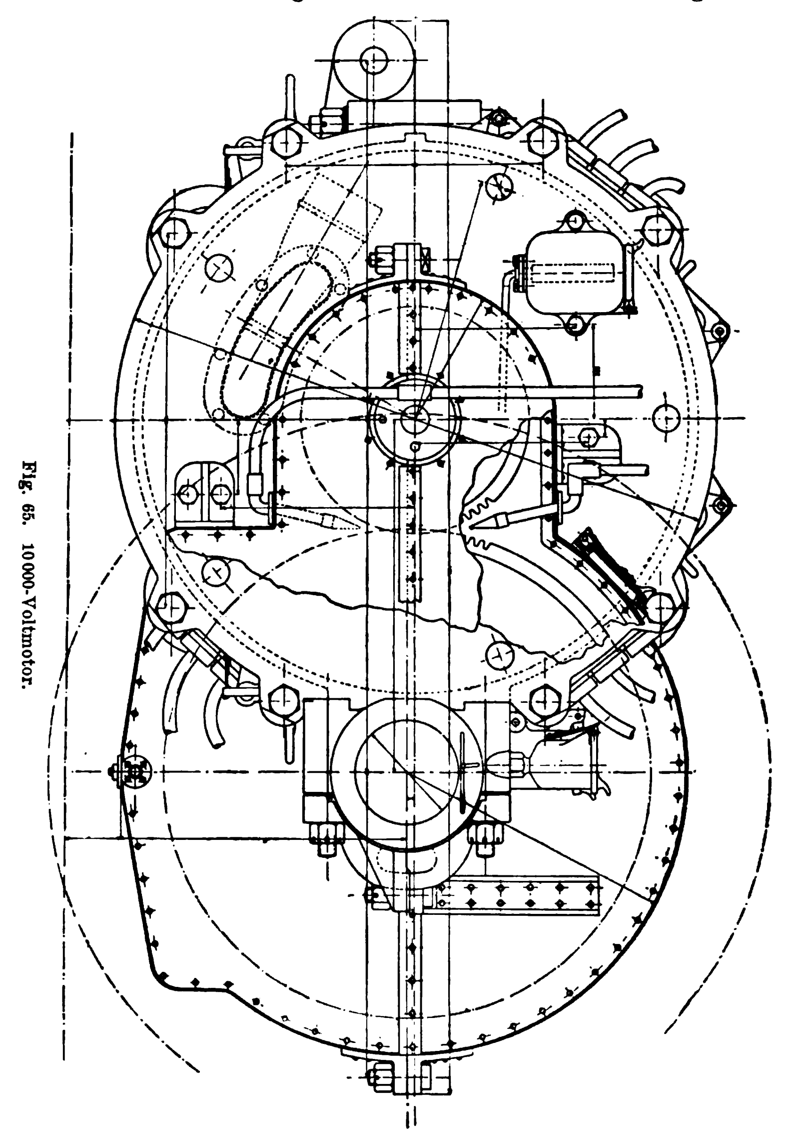


Fig. 65. 10000-Voltmotor.

Fig. 68 endlich gibt die Betriebskurven dieser Motoren. Wenn man diesen Kurven einige Aufmerksamkeit widmet, so findet man, dass trotz der hohen Spannung an den Klemmen der Motoren durchaus günstige Werte für Leistungsfaktor und Wirkungsgrad eingehalten worden sind. Nimmt man zur Beurteilung das Bild der Wicklung (Fig. 64) zur Hand, so sieht man, dass dieses Resultat auch durchaus nicht etwa auf Kosten

der Übersichtlichkeit oder Einfachheit der Konstruktion gewonnen worden ist.

146. Das Motorgewicht ist bei ca. 380 PS Höchstleistung 4 t, eine Nachrechnung des Motors ergibt dabei, dass er reichlich bemessen ist; für entsprechende Reihenschluss-Gleichstrommotoren amerikanischer Bauart finde ich das Gewicht zu 3700 kg angegeben bei Anwendung von Rädervorgelegen und zu 5200 kg bei direkter Kupplung.

147. Der Motor gibt bei 16,5 Ampère 300 PS ab; bei dem, unter dem Gesichtspunkt gegenwärtiger Bahnverhältnisse beurteilt, niedrig erscheinenden Spannungsverlust von 10 % könnte der in 97 behandelte 90 t-Zug, wenn er bei einer Ausrüstung mit 2 Motoren allein in Frage

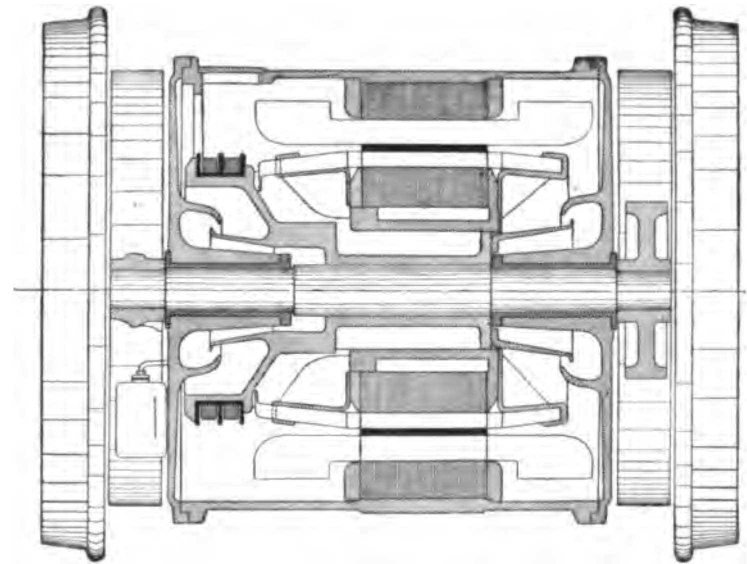


Fig. 66. Längsschnitt durch den 10000-Voltmotor.

käme, noch in einer Entfernung von 50 km vom Krafthaus bei niedrigem Puls in normaler Weise angelassen werden, wenn dorthin nur Fahrdrähte von dem bei Strassenbahnen üblichen Querschnitt führen würden. Denn wir können pro Fahrdraht einen Spannungsverlust von

$$\frac{1000}{\sqrt{3}} = 580 \text{ Volt}$$

zulassen, woraus für 2 · 16,5 Ampère ein Widerstand von 17,5 Ohm folgt. Dem entspricht bei 50 qmm Kupferquerschnitt nach

$$w = \frac{\text{konstant} \times \text{Länge}}{\text{Querschnitt}},$$

d. i.

$$35 = \frac{0{,}0175 \times L}{50}$$

$$L = 50000 \text{ m}.$$

Diese Zahl gibt eine Anschauung von dem Wert der Möglichkeit, 10000 Volt an den Klemmen der Motoren aufnehmen zu können. Ob diese Spannung eine unüberschreitbare Grenze bedeutet, ist mit Sicherheit noch nicht anzugeben; wenn man den Propheten spielen will, so kann

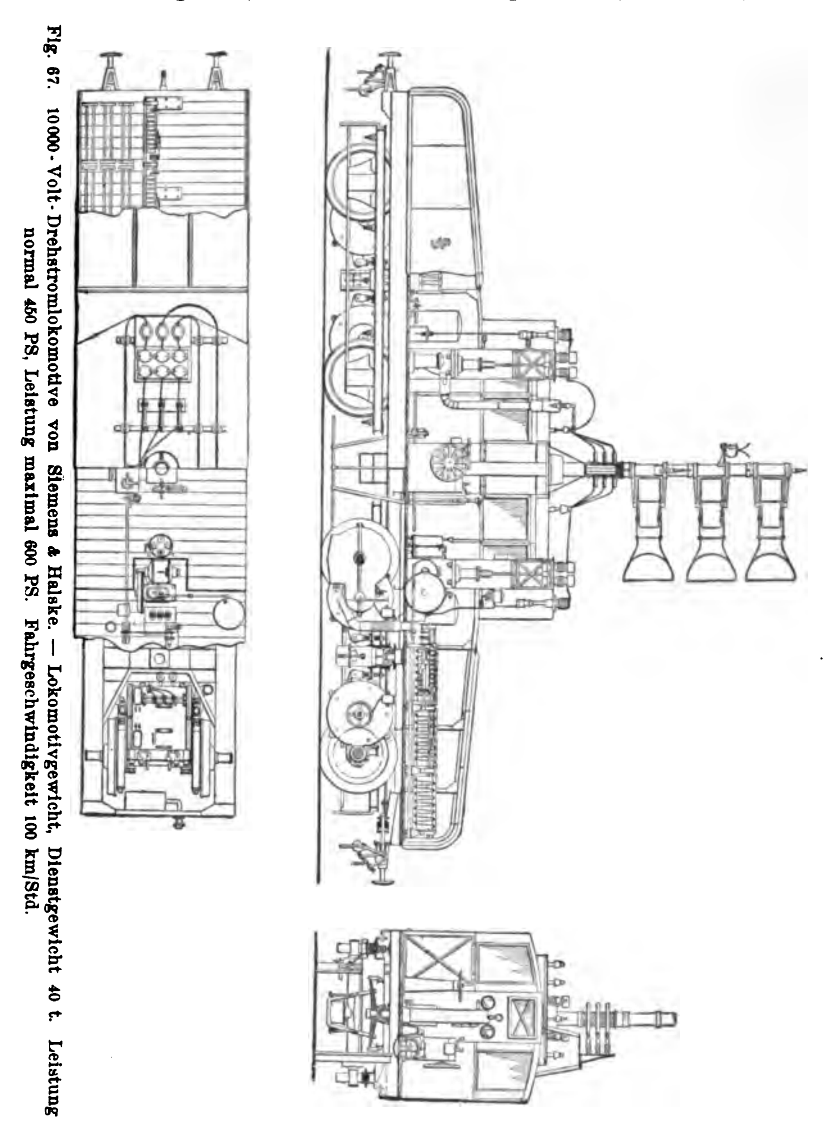


Fig. 67. 10000-Volt-Drehstromlokomotive von Siemens & Halske. — Lokomotivgewicht, Dienstgewicht 40 t. Leistung normal 450 PS, Leistung maximal 600 PS. Fahrgeschwindigkeit 100 km/Std.

man sich da sehr irren; dass man die 10000 Volt ohne Schädigung der Betriebssicherheit erreichen würde, haben z. B. vor Ausführung dieser Siemen'schen Lokomotive die meisten Ingenieure (der Verfasser schliesst sich keineswegs aus) privatim, einige sogar öffentlich in Zweifel gezogen.

148. Mit Transformierung könnten wir mit Sicherheit die doppelte, ja dreifache Spannung erreichen, wie ausgeführte Arbeitsübertragungs-

anlagen zeigen. Dann werden die Fernleitungsbedingungen bekanntlich nicht proportional der Spannung, sondern proportional dem Quadrat der Spannung günstiger. Gestatten wir wieder einen Verlust an Spannung von 10 %, so ist pro Draht der Verlust

$$\frac{3000}{\sqrt{3}} = 1730 \text{ Volt}$$

zulässig. Die Stromstärke beträgt nur noch den dritten Teil der früheren, d. i. 11 Ampère. Damit ergibt sich der zulässige Widerstand zu

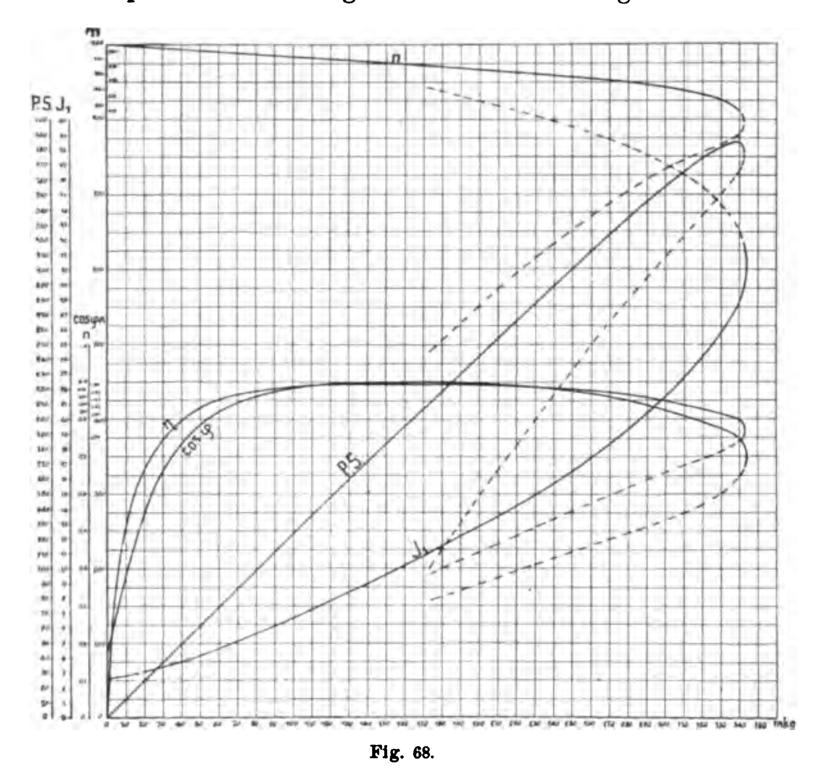


Fig. 68.

157 Ohm und die Entfernung bei Annahme von sogenanntem Trolleydraht (⌀ = 8 mm) zu

468 km.

149. Diese Zahl — die Strecke entspricht etwa der Bahnlinie Berlin-Frankfurt a. M. — soll lediglich dazu dienen, einen Begriff davon zu geben, wie leicht man die Krafterzeugung für weite Gebiete so zentralisieren könnte, dass ein Ausgleichen der Belastungsschwankungen der einzelnen Linien möglich würde. Sie zeigt ferner, dass der Gedanke, die Energie für den Eisenbahnbetrieb da zu erzeugen, wo das Brennmaterial gewonnen wird, kein leeres Hirngespinst ist und sich auf Grund ganz nüchterner Rechnungen diskutieren lässt. Ob und welche finanziellen Vorteile daraus resultieren würden, ist allerdings ohne genauere Angaben nicht

zu sagen; da sprechen ja ausserordentlich viele Momente mit. Die Elektrotechniker wollen auch zunächst gar nicht daraufhinaus unter gegenwärtigen Verhältnissen eine Ersparnis hierbei herausrechnen; ein Übertreiben der Projekte verwerfen sie mehr als ihre Gegner, man will ganz gewiss keine Überstürzung und hält es für zweckmässig, mit kleineren Gebieten anzufangen. Dabei ergibt es sich von selbst, dass man stadtbahnartige Betriebe zuerst angreift und so auszubauen sucht, dass alles, was an Erfahrungen für diese Arbeit zur Verfügung gestellt werden kann, ausgenützt wird. Damit kam man zur Nachbildung der in Amerika ausgebildeten, in ihrer Art vorzüglichen Muster. Man fand dabei, dass die dort erprobten Methoden den bisher bekannt gewordenen Drehstrommethoden gegenüber einige Vorteile gewährleisten, was bei oberflächlicher Prüfung ganz unzweifelhaft erschien. Die neueren Methoden, die hier nach Erledigung jener überschlägigen Prüfung und nach der Klarstellung aller zu beachtenden Faktoren besprochen wurden, sind im allgemeinen dabei noch nicht zur Diskussion gestellt worden. Wenn sie eine Überlegenheit des Drehstromsystemes ergeben, so ist damit ein um so erfreulicheres Resultat gewonnen, als bei vorsichtiger Beurteilung der voraussichtlichen zukünftigen Entwickelung die Ansicht, dass für den Eisenbahnbetrieb der Übergang der Betriebsmittel gewahrt bleiben muss, die im Vorwort S. 4 ausgesprochen wurde, doch wohl grundlegende Bedeutung haben dürfte und aus diesem Grunde Drehstrom am Fahrdraht wenigstens bei uns auch für die Stadtbahnen dringend empfohlen werden muss. Wirtschaftlichkeit und Zweckmässigkeit lassen sich also nach unseren Überlegungen sogar zugleich erreichen.

150. Gibt man das Vorstehende zu, so ist es sehr interessant, zu sehen, welche Ergebnisse das bekannte, von der Union E. G. in Berlin aufgestellte Projekt für die Umwandlung der Berliner Stadt- und Ringbahn bei Umgestaltung für Drehstrom verspricht. Dort wurde eine Verkehrsleistung von 9570000 Zugkm den Berechnungen zu Grunde gelegt.

Die in 97 überschlägig berechnete Bahn soll täglich 20 Stunden arbeiten und von früh bis spät 5-Minutenverkehr haben. Das ergibt bei 20 km Bahnlänge

$$20 \cdot 24 \cdot 20 = 9600 \text{ Zugkm},$$

im Jahre also

$$9600 \cdot 365 = 3500000 \text{ Zugkm}.$$

Die Bahn soll 6000000 Mk. kosten und reicht dabei auch für, der Berechnung des Projektes gegenüber, verdoppelte Zuggewichte aus, die etwa der Stadtbahn Berlin entsprechen würden, für die 2,75fache Länge und Leistung kostet sie also 16500000 Mk., gegenüber 33000000 Mk. des U. E. G.-Projektes. Diese Kosten sind aber noch etwas höher berechnet, als sie in Wahrheit werden würden, da weder Geleisverlegung

noch Beschaffung von Personenwagen erforderlich ist. Zieht man — der Berg'schen Tabelle folgend — diese Posten ab, so erhält man

12000000 Mk.

Für Gleichstrom würde man, wenn man das U. E. G.-Projekt fallen liesse und die Berg'schen Zahlen einführte

15500000 Mk.

bekommen.

Der Arbeitsverbrauch würde sich im Mittel auf

$35 \cdot 10^6$ Kw-Std. für Drehstrom

und

$45 \cdot 10^6$ Kw-Std. für Gleichstrom

stellen.

151. Stellen wir uns vor, dass die Zentrale mit Brown-Parsonsschen Dampfturbinen oder etwa Rateau-Örlikonturbinen arbeitet, so bekommen wir auf Grund der verschiedentlich ermittelten Dampfverbrauchsziffern[1]) ca.

$39 \cdot 10^7$ kg Dampf für Drehstrom,

$50 \cdot 10^7$ kg Dampf für Gleichstrom,

entsprechend einem ungefähren Kohlenverbrauch von 49000 t bei Drehstrom und 62500 t bei Gleichstrom. Nach den Angaben in der Diskussion über das Unionprojekt wäre der Koksverbrauch bei Dampfbetrieb 121000 t.

152. Diese Zahlen ergäben einen beträchtlichen Gewinn auf Grund des elektrischen Betriebes. Es ist aber, um Missverständnissen vorzubeugen, auch hier wiederholt darauf hin zu weisen, dass die Elektrotechnik nicht auf Grund der gegenwärtigen Leistungsfähigkeiten von Bahnen durchschlagende Verbesserungen gewährleistet, sondern, wie in 5 bereits angegeben wurde, vor allem

a) durch Erhöhung der Leistungsfähigkeit,[2])

daneben dann aber auch

b) durch Erhöhung der Betriebssicherheit,

c) durch Vereinfachung des Dienstes.

Rückblickend ist zu a noch einmal auf 114—115 zu verweisen, wo in der vervollständigenden Frage Drehstrom oder Gleichstrom die Wage zu Gunsten des Drehstromes ausschlägt.

153. Was b anbelangt, so ist darüber bereits im Vorwort S. 10 einiges gesagt. Der Gedanke, dass die Sicherheit erhöht wird, sobald man

[1]) pro Kw-Std. eff. 10 kg Dampf nach „Bauart und Dampfverbrauch der Dampfturbine System Brown-Bovéri-Parsons" von Emil Sinell, Berlin SW. 68. Nahezu derselbe Dampfverbrauch wird für die Rateauturbine von der Maschinenfabrik Örlikon angegeben. Bei abnehmender Belastung steigt diese Zahl nur wenig bis zu halber Last und erreicht dort ca. 11—12 kg. Gerechnet wurde mit 11 kg pro Kw-Std. als Mittelwert.

[2]) Eine solche liegt bekanntlich dem Unionprojekt zu Grunde.

Signal und Fahrt zwangläufig verbindet, lässt sich ohne Zweifel nicht von der Hand weisen. Ein Eisenbahnzug mit Dampfbetrieb oder dergl. gleicht in dem Maſse, wie wir zu höheren Fahrgeschwindigkeiten kommen, mehr und mehr dem Torpedo, das das Lancierrohr verlassen hat. Der elektrische Zug dagegen bleibt in der Hand derer, die wissen oder rechtzeitig sehen, ob die Strecke bis zum Ziel, der nächsten Station, frei ist.[1])

154. Nun ist es wieder für Drehstrom günstig, dass bei seiner Anwendung unter hoher Spannung das Schalten so grosser Energiemengen, wie sie beim schweren Eisenbahnbetrieb nötig werden, leichter ausführbar ist als bei Gleichstrom, wo es nach Überschreitung einer nicht sehr hoch liegenden Grenze in einer Kombination von Streckenblock und Arbeitsleitungsausschalter gegenwärtig überhaupt fast unausführbar wäre.

155. Zur Frage der Betriebssicherheit ist zweifellos auch die Möglichkeit zu rechnen, die Motorleistung dann steigern zu können, wenn die Geleise für die Räder schwer gangbar werden, wie bei Schneewetter. Hier bietet wieder der Drehstrommotor einen Vorteil; man kann, wie in 54 erörtert wurde, seine Zugkraft bedeutend steigern, wenn man die Spannung an seinen Klemmen etwas erhöht. Das bedingt dann allerdings höhere Eisenverluste und entsprechend den gesteigerten Maximalwerten und Mittelwerten der Arbeit überhaupt höhere Motorerwärmung. Da aber im Winter die Kühlung der Motoren eine grössere sein wird, wie zur milden Jahreszeit, so wird die Motortemperatur an sich doch keine unzulässige Höhe erreichen, so dass man die Spannung unbedenklich höher halten kann.

156. Auch das, was sich auf Vereinfachung des Dienstes bezieht, ist schon mehrfach und namentlich im Vorwort berührt worden; die Erfahrungen der Burgdorf-Thun-Bahn bestätigen das, was dort behauptet wurde, in vollstem Maſse. Und wieder zeigt sich der Drehstrommotor mit der Möglichkeit der selbsttätigen Verlangsamung der Züge vor der Haltestelle (solche Einrichtungen kennt man in dem dem Stadtbahnbetrieb nicht unähnlichen Fördermaschinenbetrieb zwar auch für Gleichstrom, aber in weniger einfacher Anordnung) und der ebenfalls selbsttätigen Geschwindigkeitsregulierung auf der Talfahrt als derjenige, der mehr zu erreichen gestattet, als der Gleichstrommotor.

157. Alles das hat zusammengewirkt, um die Meinung manches Eisenbahners, der ursprünglich nur zur Gegenpartei hielt, für Drehstrom zu gewinnen, und es lässt sich behaupten, dass die, die Drehstrombahnen empfehlen, heute lange nicht mehr so vereinzelt dastehen, als vor etwa

[1]) Auf andere Vorzüge des elektrischen Betriebes gegenüber Dampfbetrieb näher einzugehen, ist an dieser Stelle nicht der geeignete Platz. Zur Behandlung des am Schluss des Vorwortes erwähnten Artikels der Württembergischen Eisenbahnzeitung genügt das, was im Vorwort gesagt wurde.

vier Jahren. Natürlich fehlt es aber auch an anderen Einwendungen als denen, die das Vorwort bringt, und Gegenvorschlägen nicht. Sie führen indessen alle zurück auf den kommutierenden Motor, also auf hermetische Kapselung und niedrige Spannungsgrenze, zwei Grundbedingungen, die einen Wettbewerb mit dem einfachen Dreiphasenmotor nicht sehr aussichtsvoll erscheinen lassen und das Prinzip der Nutzbarmachung des Übersynchronismus ausschliessen. Da damit ganz wesentliche Vorteile aufgegeben werden, so glaube ich, dass mein Appell an die Eisenbahner, dem Drehstrommotor Beachtung zu schenken, nicht unberechtigt war und keineswegs auf „blindem" Eifer[1]) beruhte.

158. Auch der sehr interessante Vorschlag von Oberst Huber,[2]) eine Umformerlokomotive zu benutzen, die ähnlich der Heilmannlokomotive Gleichstrom für den Antrieb der Achsen in einem besonderen Maschinenaggregat erzeugen und an die Motoren abgeben soll, will mir nicht als ernster Konkurrent des Drehstromes erscheinen. Nach ihm kann man zwar vom Fahrdraht hohe Spannung direkt abnehmen, kann auch die Arbeitsleitung anstatt mit Drehstrom und drei Stromzuführungen mit Wechselstrom und einer Stromzuführung betreiben, also eine vereinfachte Oberleitung benutzen; man erhöht aber das Zuggewicht und den Preis des Rollmaterials bedeutend, verliert die Selbsttätigkeit der Regulierung und muss auch von der Einfachheit des Drehstromwagens viel aufgeben.

159. In technischen Dingen ist es, wie ich schon sagte, misslich, den Propheten spielen zu wollen, deshalb habe ich mich darauf beschränkt, an Bestehendem oder voll Erkanntem die Frage zu prüfen, „ob Drehstrominduktionsmoter oder kommutierender Serienmotor?" ich habe mich bei eingehender Würdigung der Erfahrungen eines dreijährigen öffentlichen Betriebes und der bedeutensten auf die Zukunft berechneten Versuchsarbeiten von der Stichhaltigkeit der Einwendungen gegen Drehstrom nicht überzeugen können und meine Meinung ist nach wie vor die, dass dem kommutatorlosen Motor der Vorzug gebühre, und zwar für Nah und Fern. Und was den letztgenannten Ferndienst anbelangt, so sind ja auch die Herren, die sonst auf der Stadtbahn lieber den Reihenschlussmotor angewandt sehen würden oder, wie die meisten Amerikaner, für das einzig Richtige halten,[3]) grösstenteils meiner Ansicht, so dass schliesslich, abgesehen von allem anderen, der Drehstrommotor schon allein dann zur Notwendigkeit auch auf der Stadtbahn wird, wenn ich recht

[1]) E. T. Z. November 1902, S. 1043.

[2]) „Elektrische Traktion auf normalen Eisenbahnen". Sonderabdruck aus der Schweizerischen Bauzeitung. Bd. XXXIV. No. 10, 11 u. 12.

[3]) Vergl. z. B. Vol. XII of the Transactions of the American Institute of Electrical Engineers S. 1146.

damit habe, dass die Wahrung der Übergangsfähigkeit der Betriebsmittel[1]) bei uns eines der vornehmsten Gesetze des Eisenbahnbaues darstellt.

[1]) Vorwort S. 4.



Drehstrom-Streckenausrüstung für Vollbahnzwecke (Siemens & Halske A.-G.).

Nachtrag zum Vorwort.

Die Diskussion über die Frage der Drehstrommotoren hat während der Drucklegung des vorliegenden Heftes noch folgende Fortsetzung gehabt:

E. T. Z. 1902, S. 983.

Ein Vorwurf, den die Vertreter des Gleichstromes gegen die Drehstrommotoren vorbringen, ist, dass wegen des geringen Luftspaltes Reparaturen sehr häufig nötig sein werden, und ein zweiter Vorwurf bezieht sich auf die angeblich geringe Anzugskraft solcher Motoren. Die Praxis hat beide Vorwürfe glänzend widerlegt. Als ein Beitrag zu diesem Gegenstande möge hier ein Zitat aus einem Briefe Raum finden, den wir von Herrn Prof. Kübler vor einigen Tagen erhalten haben. Dieser Herr hatte kürzlich auf der Burgdorf-Thun-Drehstrombahn Versuche angestellt und schreibt unter anderem folgendes: „Das Resultat meiner Messungen, die in Gegenwart und unter

Teilnahme des Depotchefs der Burgdorf-Thun-Bahn Herrn Krähenbühler und des Ingenieurs Herrn Morgenthaler von Brown, Bovéri & Co. aufgeführt wurden, kann bei dem natürlich sehr umfangreichen Zahlenmaterial erst in einigen Wochen ganz klargestellt werden. Das lässt sich aber schon jetzt mitteilen, dass, wie ich mich überzeugt habe, in den drei Jahren des bisherigen Betriebes die Anwendung des direkten Drehstrombetriebes sich glänzend bewährt hat. Motorreparaturen sind keine vorhanden! Die Stufenschalter der Widerstände sehen wie neu aus. Ebenso die Fahrschalter. Man arbeitet gegenwärtig mit etwas höherer Spannung am Fahrdraht, als zu Anfang, nämlich mit 850 Volt; irgend welche Schwierigkeiten haben sich daraus nicht ergeben. Mit Rücksicht auf die von Dr. Niethammer vermutete grosse Motorerwärmung habe ich einmal einen Güterzug begleitet, dessen Lokomotive auf jeder Station Verschiebedienst zu besorgen hatte, und ein anderes Mal ohne Pause ca. 20mal einen Zug mit einem Treib- und drei Anhängewagen anfahren lassen. Im letzteren Falle wurde dann noch einmal auf der Steigung angefahren und schliesslich bei voller Fahrt der Motor umgesteuert. Trotz alledem war die Wickelung kaum handwarm."

In E. T. Z. 1902, S. 1043 erschien am 27. November 1902:

Drehstrom- versus Gleichstrombahnen.

Unseren Bericht über das Lamme-System des Einphasen-Bahnbetriebes in Heft 45 haben wir durch einige allgemeinere Betrachtungen eingeleitet und bei dieser Gelegenheit auch einen Auszug aus einem uns von Prof. Kübler übersandten Brief abgedruckt. Im Anschluss hieran ersucht uns Prof. Niethammer um Aufnahme der folgenden Berichtigung:

In Heft 45 der E. T. Z. 1902 veröffentlichte die Redaktion unter ihrer eigenen Verantwortlichkeit gelegentlich des neuen einphasigen Bahnsystems der Westinghouse Co. eine Zuschrift von Prof. Kübler, worin konstatiert wird, dass Drehstrom-Induktionsmotoren der Burgdorf-Thun-Lokomotiven im Rangierbetrieb nur handwarm werden. Da dies im Widerspruch zu meinen Auseinandersetzungen in E. T. Z. 1902 S. 439 sowie S. 579 stehen soll, möchte ich meinen damaligen Standpunkt vollständig präzisieren:

Ich habe an genannten Stellen nur nachgewiesen, dass der Drehstrom-Induktionsmotor sich bei häufigem Anlassen und bei der gewöhnlichen Widerstandsschaltung wesentlich mehr erwärmt als der Gleichstrom-Serienmotor, sofern beide Motoren im gleichen Raum untergebracht werden müssen. Weiter sagte ich, dass die Drehstrommotoren für schwierige Bahnbetriebe, die nur aus Anfahren und Auslaufen bestehen und wobei Gleichstrommotoren eine Übertemperatur von 150° annehmen, unter Umständen versagen, da sie noch heisser als 150° werden, event. gegen 300°. Unter schwierigen Betrieben verstand ich, wie aus dem Text unschwer hervorgeht, Züge mit schweren und zahlreichen Wagen und beschränktem Raum für die Lokomotivmotoren, so dass sie bei Gleichstrom schon 100—200° warm wurden. Auf die Burgdorf-Thun-Bahn angewendet, wo solche Verhältnisse gar nicht vorliegen, heisst das gar nichts anderes, als die dortigen Motoren würden eben als Gleichstromtypen noch einige Grade kälter bleiben, als handwarm. Trotzdem die Gleichstrommotoren noch andere Vorzüge gegenüber den Drehstromtypen haben, betone ich, dass ich in meinem früheren Aufsatz nur die Frage der Erwärmung erörtert habe. Es lag mir auch die Behauptung vollständig fern, als ob der Drehstrommotor sich gar nicht für Bahnen eigne; ja ich ging so weit, zu konstatieren, dass bei entsprechender künstlicher Kühlung, die aber bis jetzt noch nicht erprobt sei, der Drehstrommotor auch für die eingangs erwähnten schwierigen Vorortbetriebe, wobei Gleichstrommotoren 150° warm werden, zu verwenden sei. Ich hielt es bei der etwas blinden Voreingenommenheit für Drehstrom, speziell in Deutsch-

land, für angezeigt, auf gewisse Nachteile der Drehstrommotoren nachdrücklich hinzuweisen, während ich die Vorteile als bekannt voraussetzte.

Die Thesis, die ich zur Widerlegung stellte und noch stelle, lautet also:

Der Drehstrom-Induktionsmotor erwärmt sich bei häufigem Anlassen in der gewöhnlichen Widerstandsschaltung mehr als ein im gleichen Raum untergebrachter Gleichstrom-Serienmotor, oder:

Setzt man in eine für stark intermittierenden Betrieb gebaute Gleichstromlokomotive, deren rationell gebaute Motore schon sehr heiss werden (150° und mehr), Drehstrommotoren, so werden die Motoren heisser wie zuvor, falls man nicht andere bezw. künstliche Kühlmittel anwendet.

Die Kollektormotoren liess ich bei meinem tabellenmässigen Vergleich (E. T. Z. 1902 S. 439) geflissentlich ausser Betracht, obwohl ich bei der Besprechung der Stromzuführung (mittlere Spalte oben S. 439) eben an solche Motoren mit lamelliertem Felde dachte, die bei entsprechender Bauart sowohl von Gleichstrom wie von Wechselstrom betrieben werden können.

Worauf als Erwiderung ebenda S. 1127:

Der Versuch, auf den sich meine in Heft 45 der E. T. Z. abgedruckte Mitteilung bezieht, wurde mit einem zu Versuchszwecken eigens gebildeten Zuge von 62 t Gewicht, bestehend aus Treibwagen, einem angehängten Personenwagen und drei Güterwagen, gemacht; das Motorgewicht betrug 4 t. Auf einer Strecke am Bahnhof Konolfingen wurde zunächst in beiden Richtungen sechsmal angefahren, sofort gehalten, wieder angefahren u. s. w. Hierauf wurde das Zuggewicht auf 52 t verringert, weil wir den Versuch gar nicht der Erwärmung wegen machten, sondern um Wilson's Zahlen zu prüfen, und weil Wilson gerade 52 t-Züge benutzt hat. Es fanden nun fünf Anfahrten in der einen und sechs in der anderen Richtung statt, hierauf eine Anfahrt auf einer $2^1/_2\,^0/_0$igen Steigung, dann bei voller Geschwindigkeit Umsteuerung der Motoren und endlich, nach Eintritt des Stillstandes, die letzte Anfahrt, die zugleich Rückfahrt war.

Hiernach ist es jedem möglich, sich ein Urteil darüber zu bilden, ob diese Versuche geeignet waren, ein Urteil über das Verhalten der Motoren bei „schwierigem" Eisenbahnbetrieb zu gestatten.

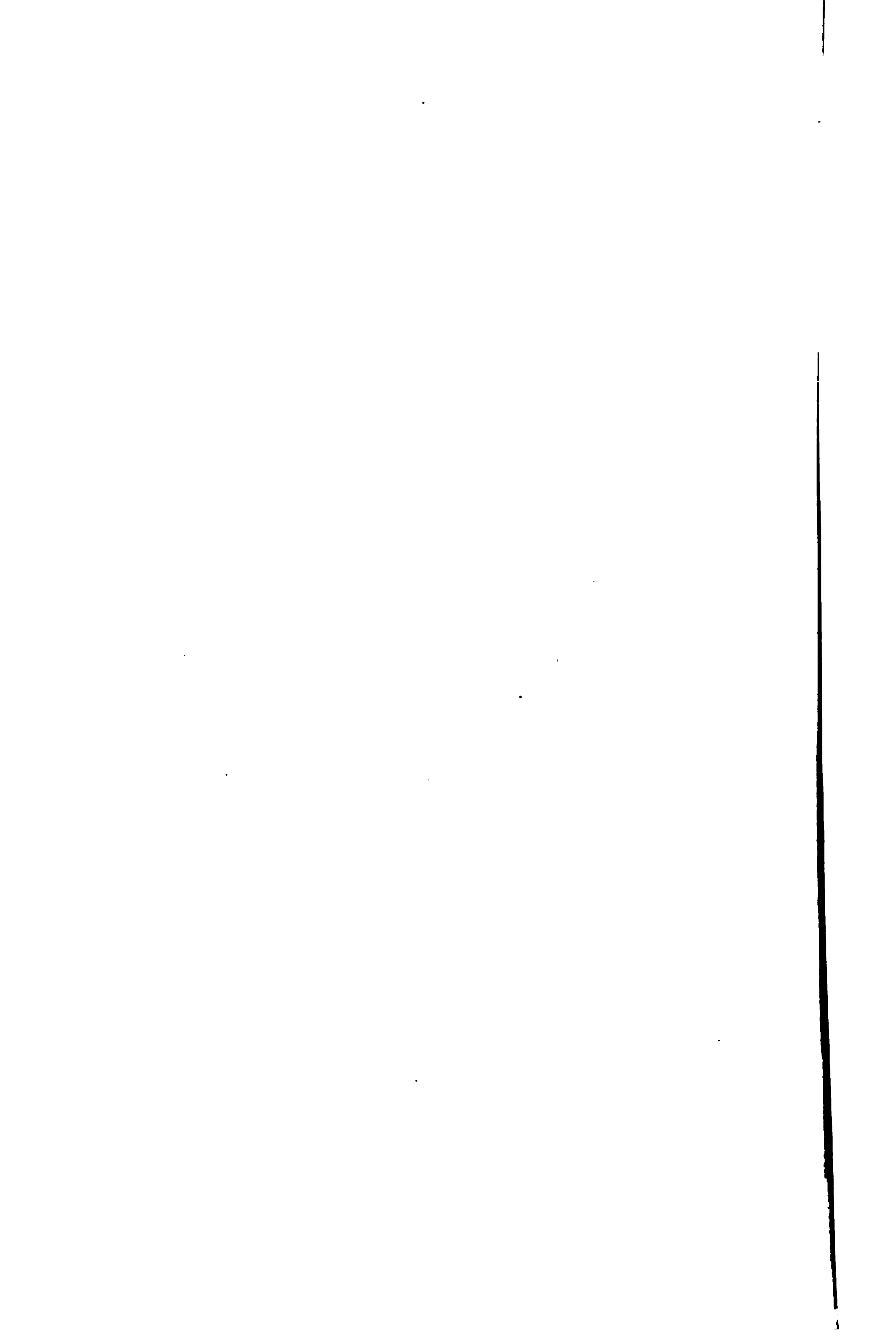
Mit Rücksicht auf die Zuschrift von Prof. Dr. Niethammer auf S. 579 der E. T. Z. möchte ich noch hervorheben, dass keineswegs übermässig beschleunigt wurde: es ist überhaupt ein Irrtum, wenn angenommen wird, dass der Drehstrommotor die grössere Anfahrbeschleunigung bedingt, obwohl er ja früher die volle Geschwindigkeit erreicht, als der Reihenschlussmotor. Letzterer ist es vielmehr, der mit sehr hoher Anfangsbeschleunigung, also, wenn man so will, „ruckweise" ansetzt; hierfür geben die Kurven von E. J. Berg ein sehr anschauliches Bild.

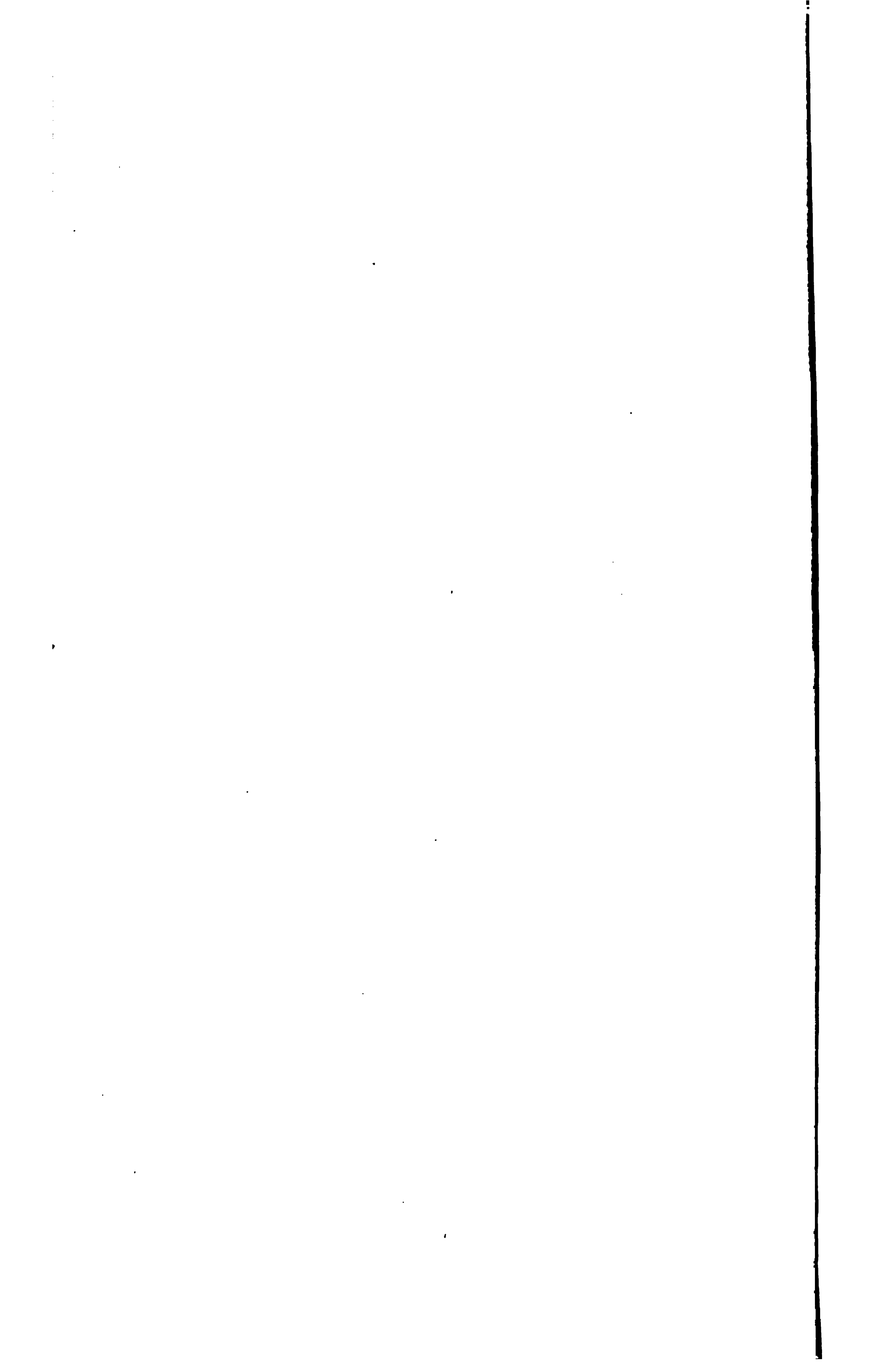
Da diese Fragen weiteres Interesse haben und da ich ja auch versprochen habe, die Angelegenheit in aller Ausführlichkeit zu behandeln, so möchte ich die Diskussion bis zum Erscheinen meines kleinen Berichtes (Leipzig, A. Felix Verlagsbuchhdlg.) vertagen; der Druck dürfte in etwa drei Wochen erledigt sein. Ich entnehme aber schon jetzt gern der Zuschrift von Professor Dr. Niethammer auf S. 1043 der E. T. Z., dass wir uns der Verständigung über das vorliegende Thema immer mehr nähern, wie ich es eigentlich auch niemals anders erwartet hatte.

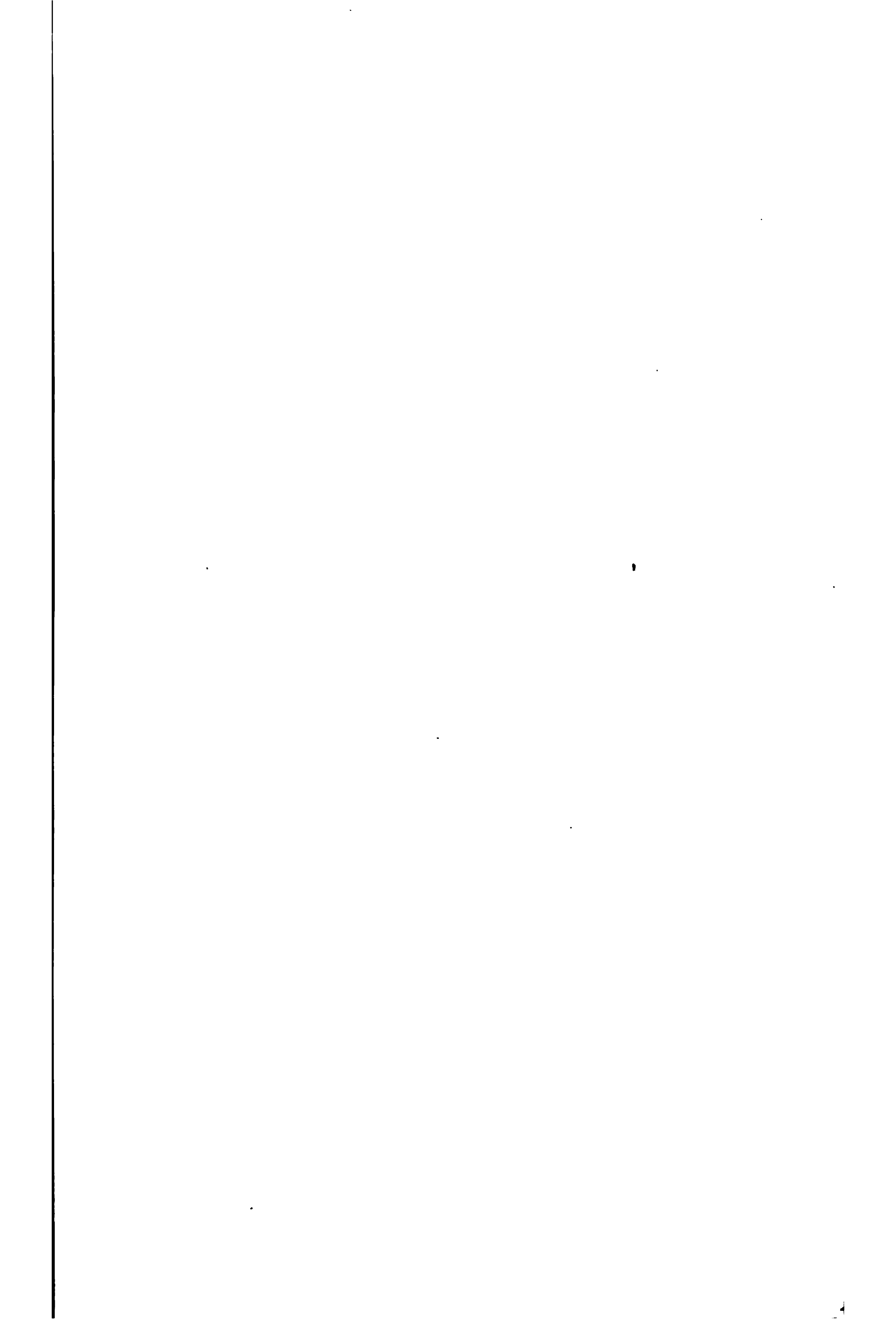
Dresden, den 29. November 1902.

W. Kübler.

Druck von Friedrich Stollberg in Merseburg





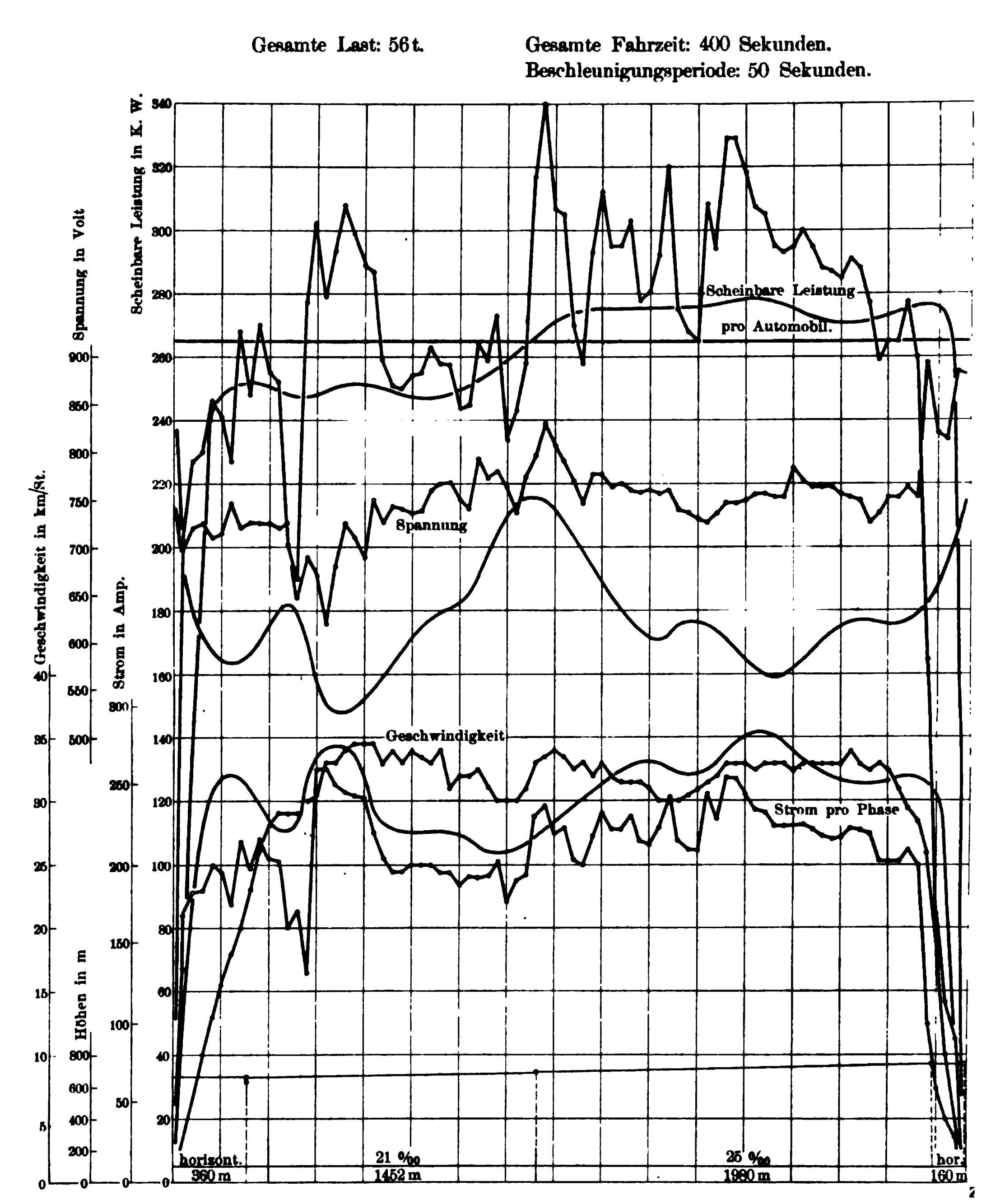






Konolfingen-Höchstetten. Bergfahrt.
Automobil mit angehängten Güterwagen.

Gesamte Last: 56 t. Gesamte Fahrzeit: 400 Sekunden.
Beschleunigungsperiode: 50 Sekunden.



Die ohne Beobachtungspunkte eingetragenen Kurven s

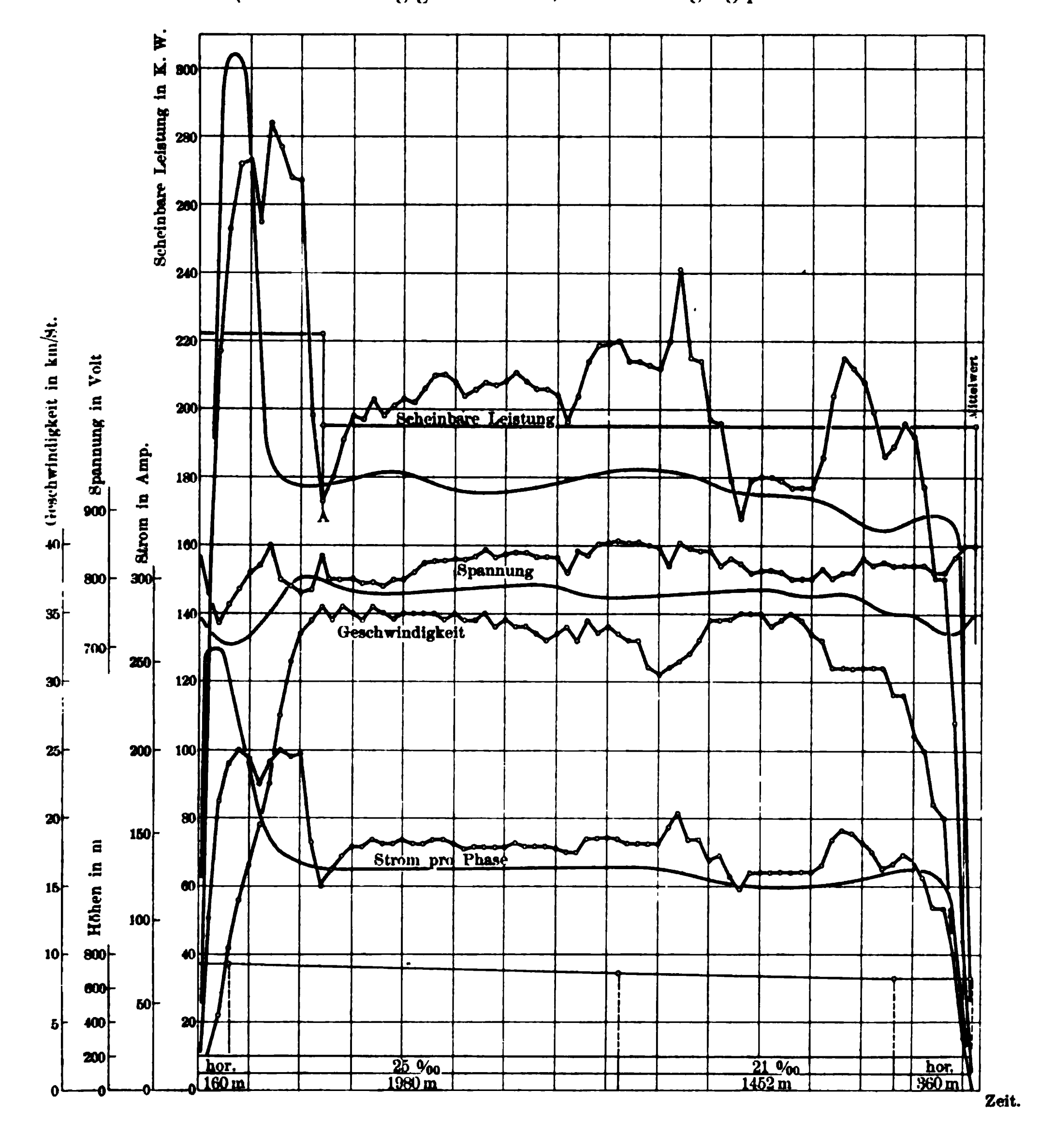
Verlag von Arthur Felix in Leipzig.

Höchstetten-Konolfingen. Thalfahrt.

Automobil mit angehängten Güterwagen.

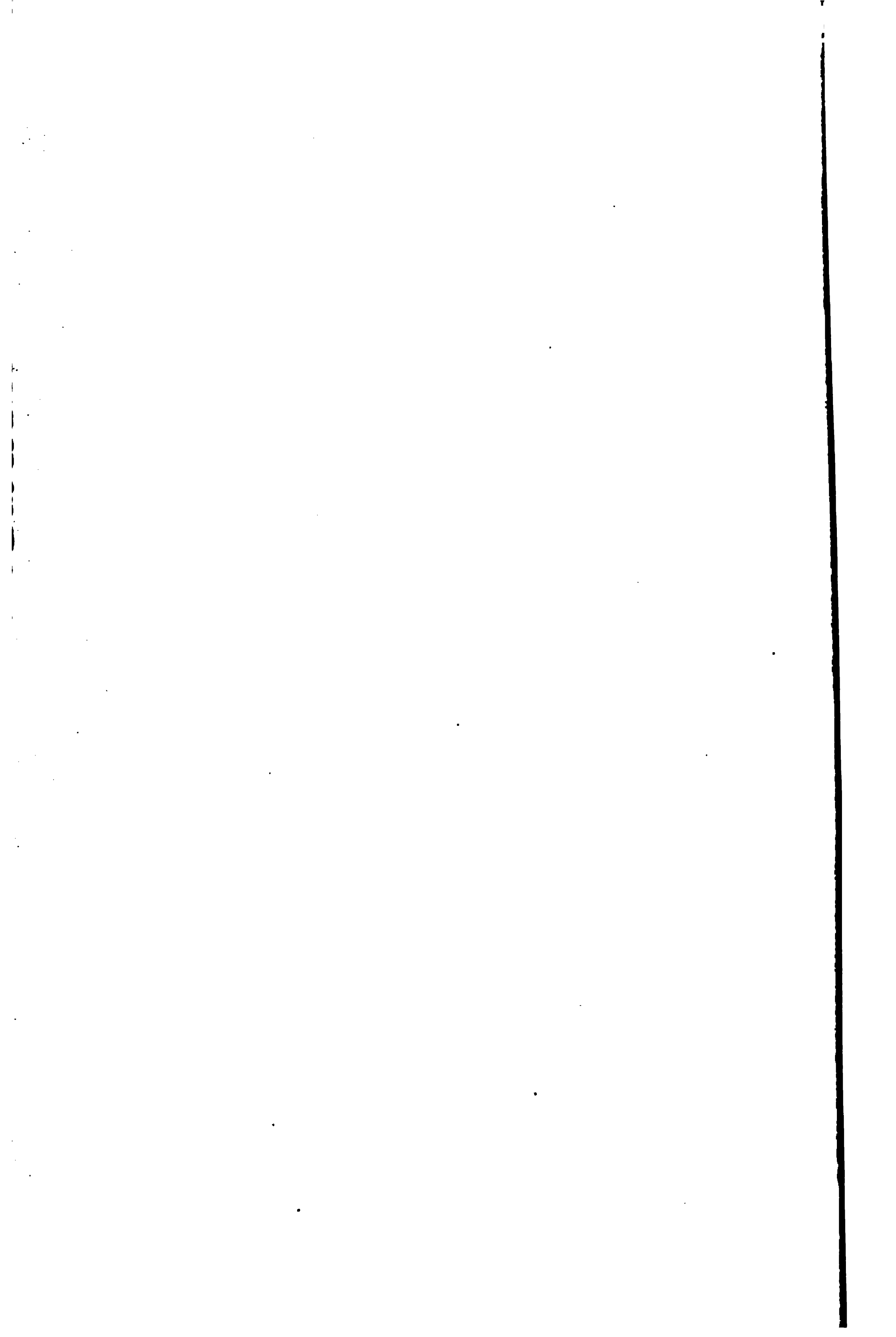
Gesamte Last: 56 t.

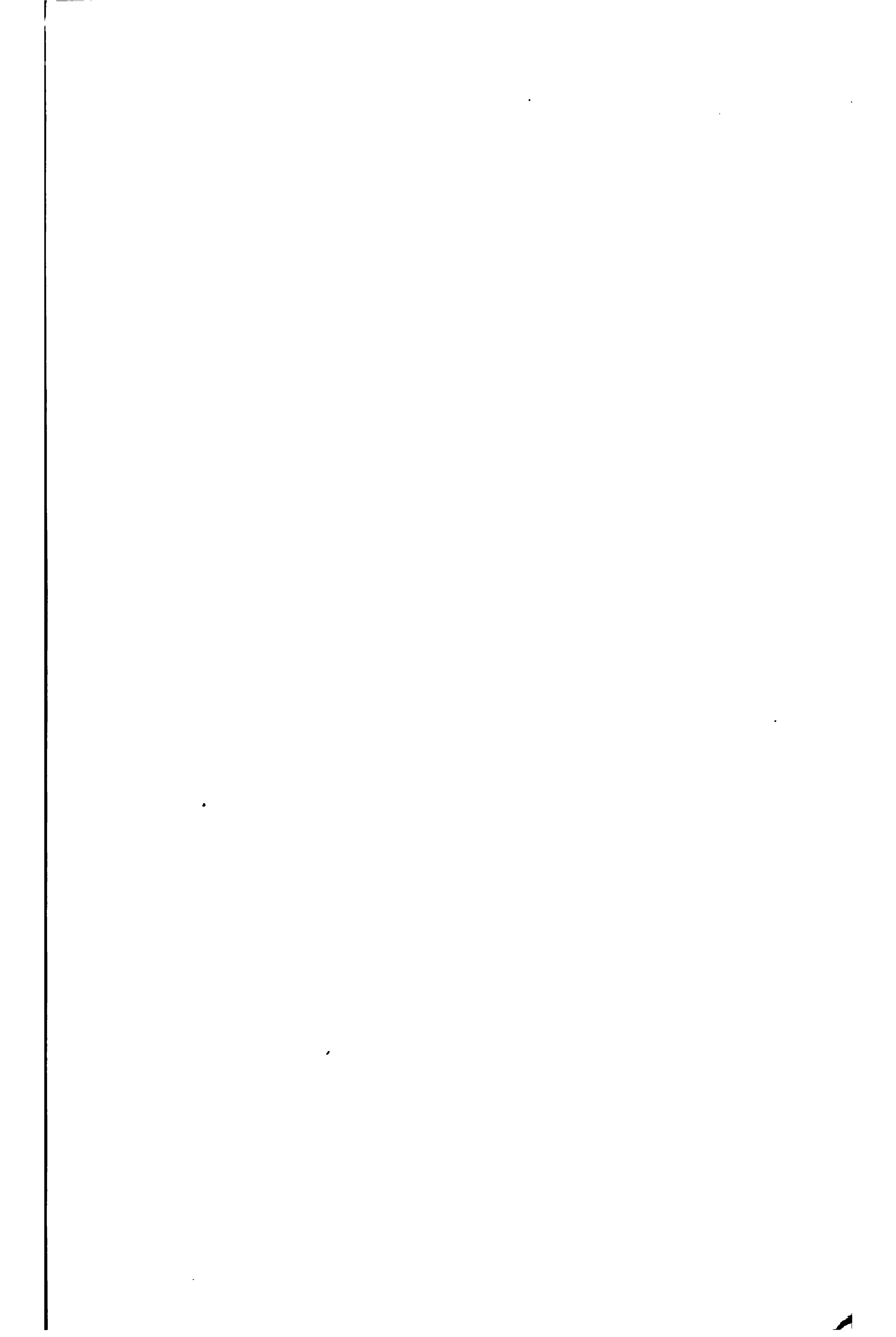
(Bis A: Verbrauchte Arbeit) Gesamte Fahrzeit: 370 Sekunden.
(Von A: Zurückgegebene Arbeit) Beschleunigungsperiode: 50 Sekunden.

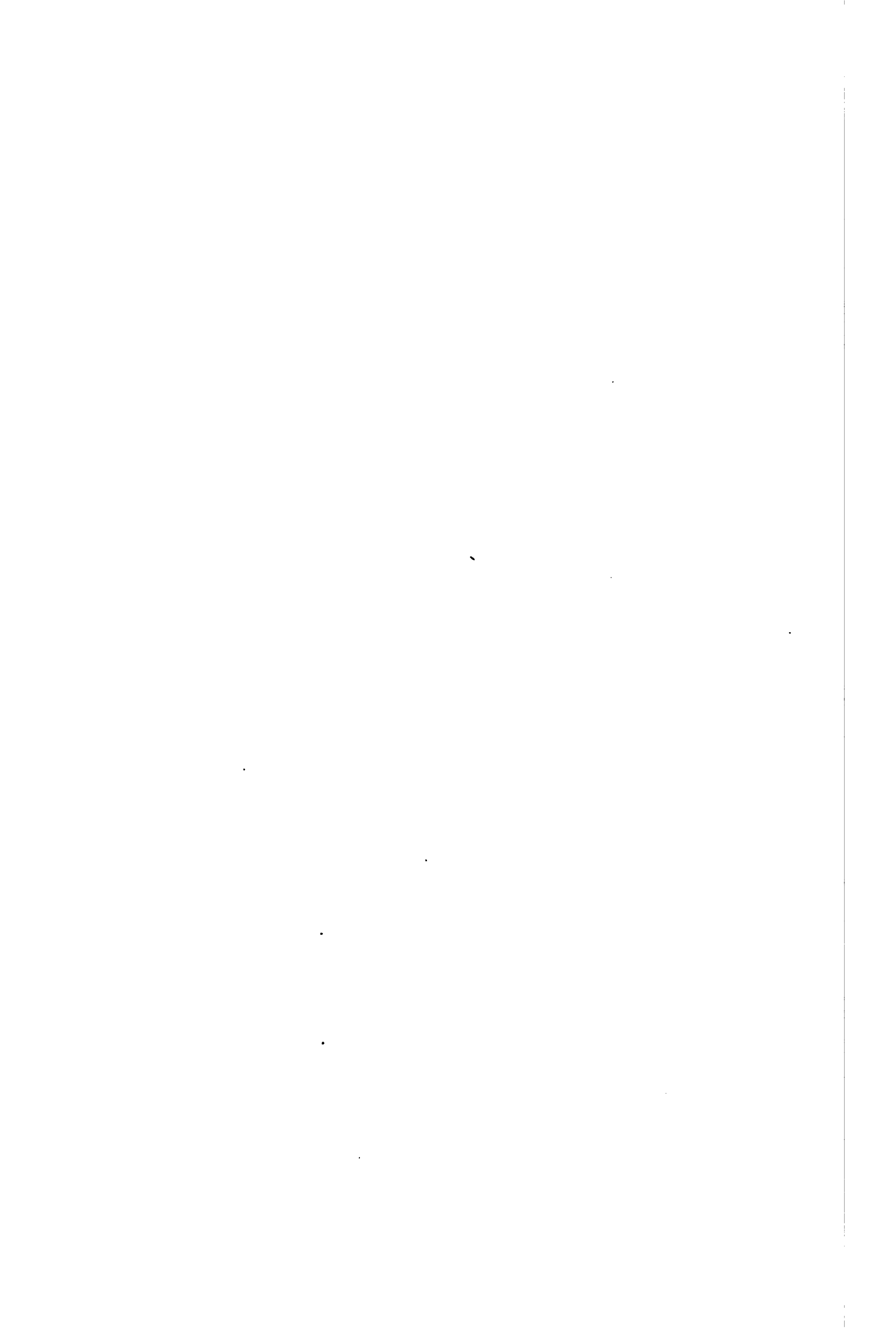


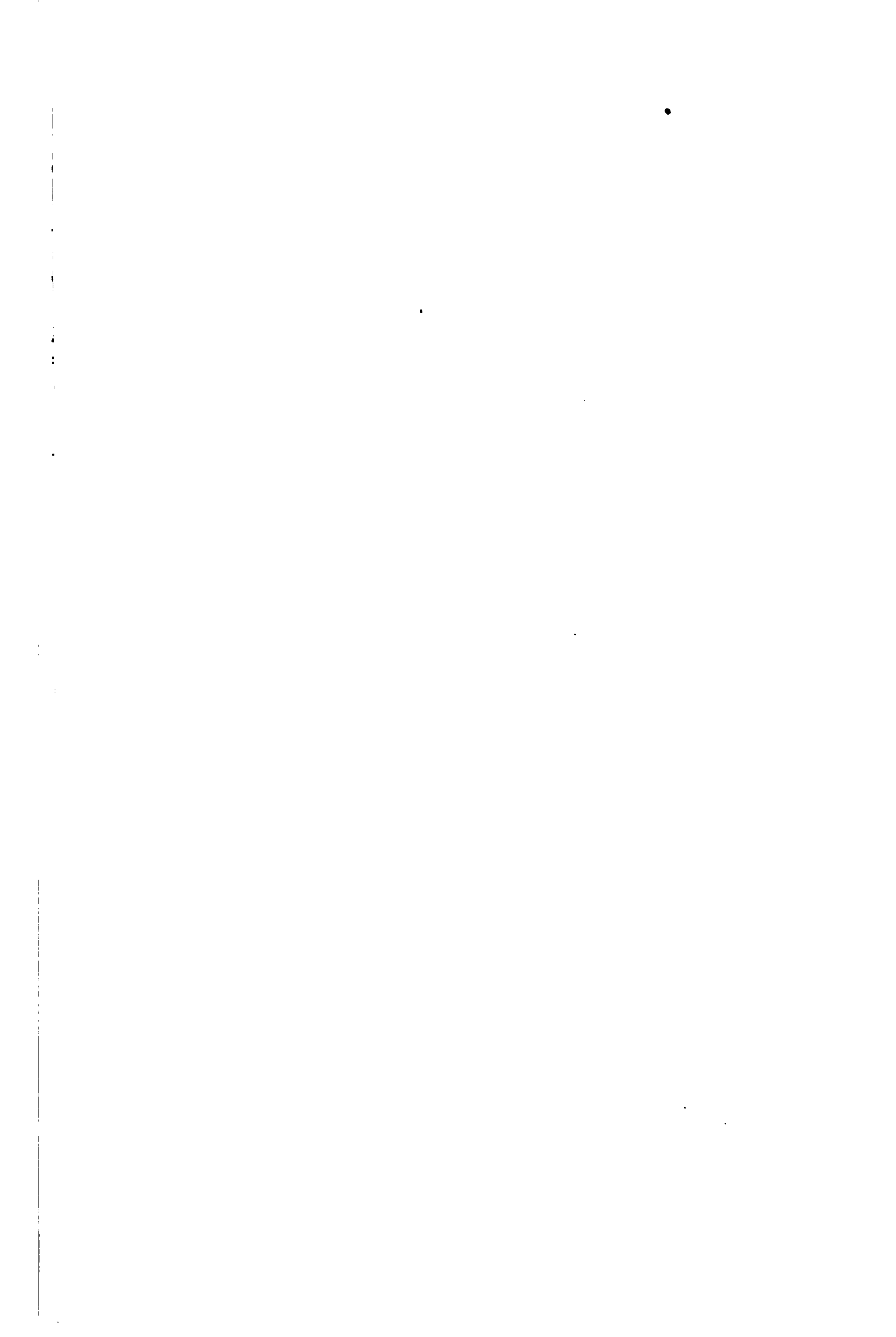
1 Abmessungen von Professor E. Wilson dar.

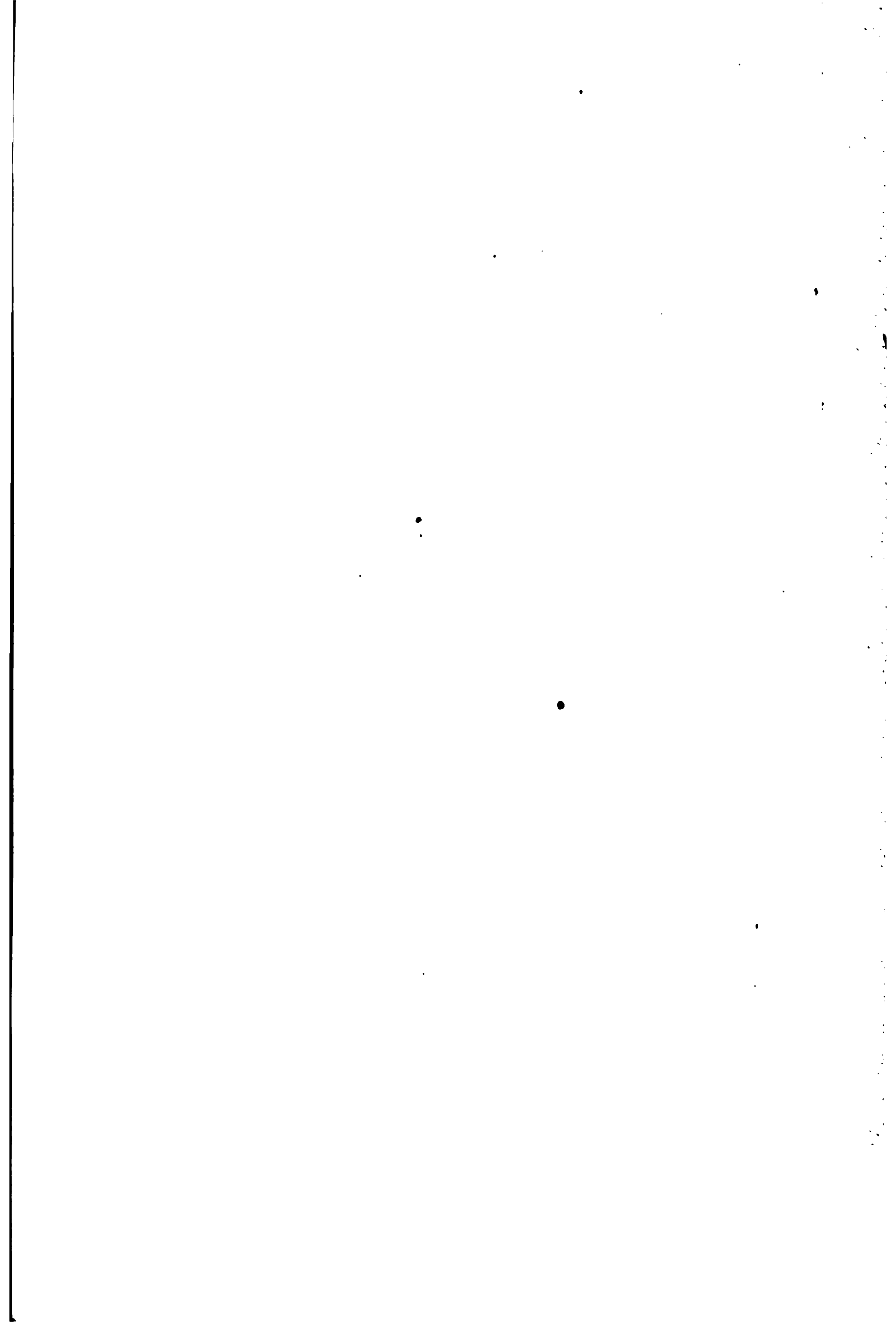
Techn.-art. Anst. von Alfred Müller in Leipzig.











35 m bis nächste Stange

30 m

20 m

B

7 m

A

18 m

Der Abspanndraht ist 500 mm höher als die Queraufhängung

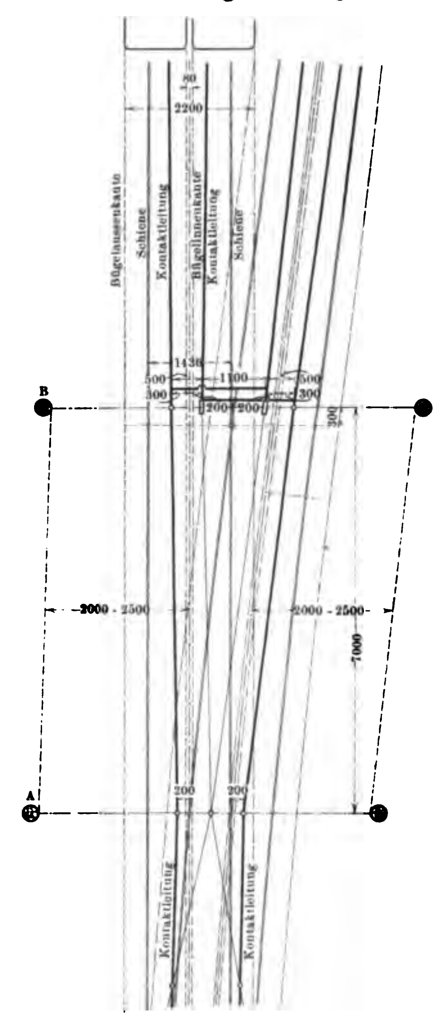
35 m bis nächste Stange

Fig. 29.

Anordnung der Kontaktleitung in der normalen einfachen Weiche bei der Burgdorf-Thun-Bahn.

System Brown, Bovéri & Co. (Patent).

Leitungsführung.



—— Kontaktleitungen
—— Stahldraht, von allen übrigen Leitungen isoliert.
—·— Queraufhängungen.
▭ Streckenisolatoren.



Einzelheiten von
der Burgdorf
(Konstr. von Bro

Fig

Queraufhängung am

ev. nur ein
in der Mi
beiden

240

80

8 mm

A

C

550

200

2000 - 2500

senkrecht über Geleismitte

180

Queraufhängung am

700

240

A

90

C

500

300

1100

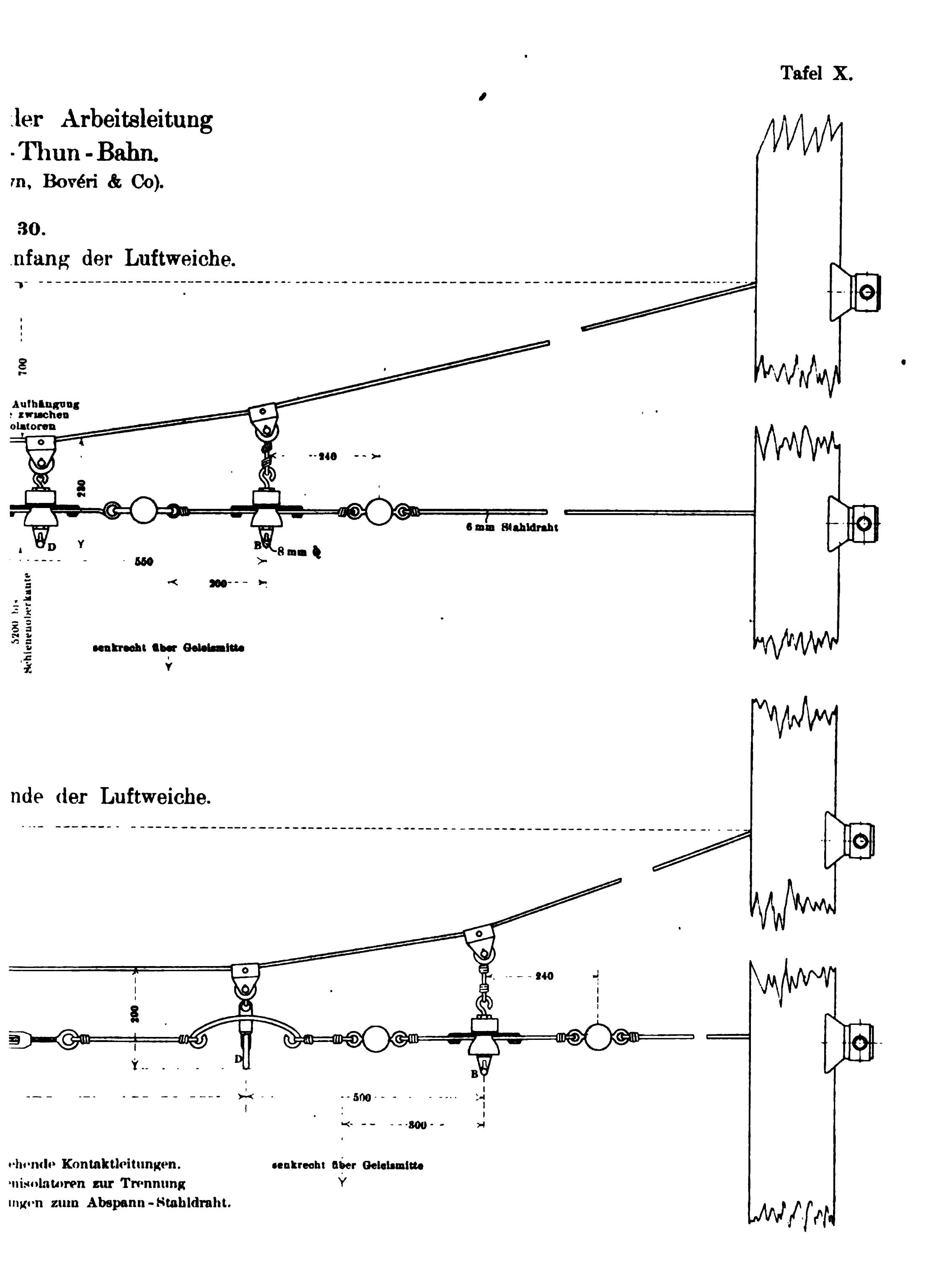
2000 - 2500

senkrecht über Geleismitte

5200 bis Schienenoberkante

A u. B - durch
C u. D - Streck
der Kontakt

Verlag von Arthur Felix in Leipzig.



Techn.-art. Anst. von Alfred Müller in Leipzig.







Fig. 31.
Freie Strecke bei Konolfingen.



Fig. 32.
Einfahrt in das Depot in Konolfingen.

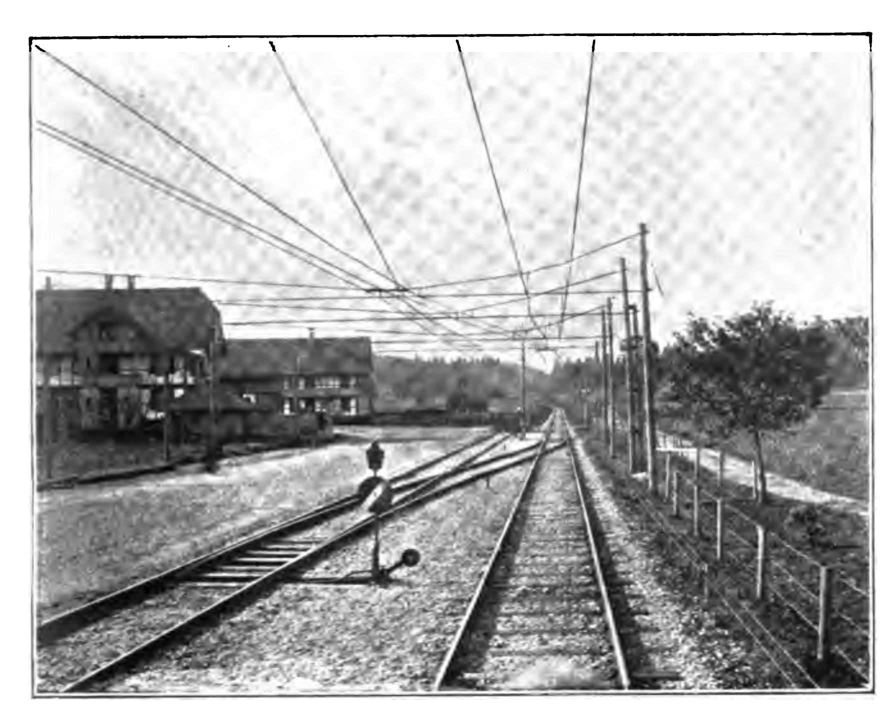


Fig. 33.
Weiche bei der Einfahrt in eine normale Station.

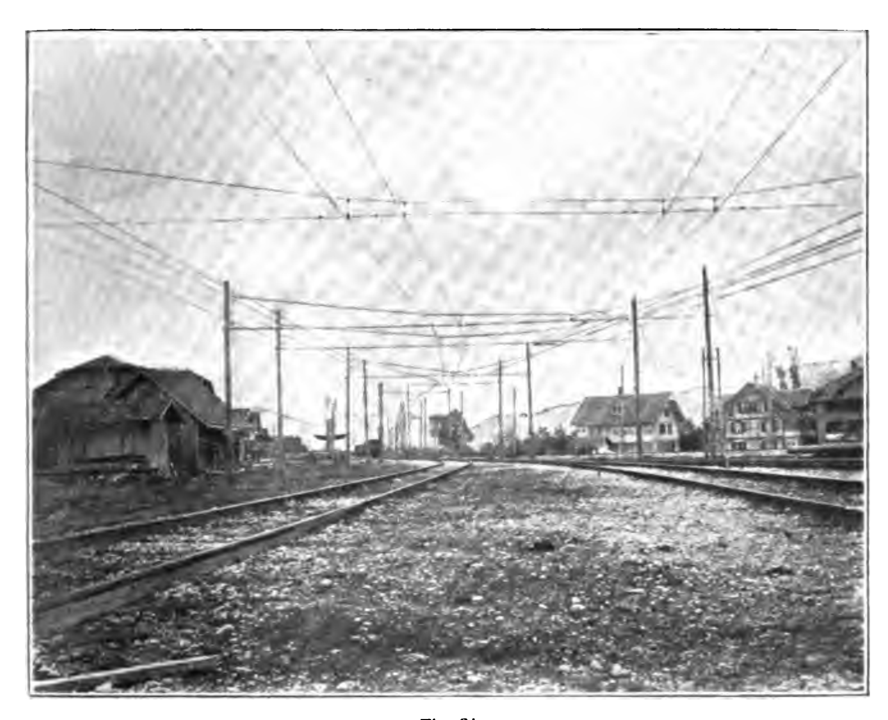


Fig. 34.
Einfahrt in Station Konolfingen.

Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.



Lokomotive der Burgdorf-Thun-Bahn mit Stromabnehmer.

(Brown Bovéri & Co.)

Fig. 35.
Lokomotive, fertig zur Fahrt.

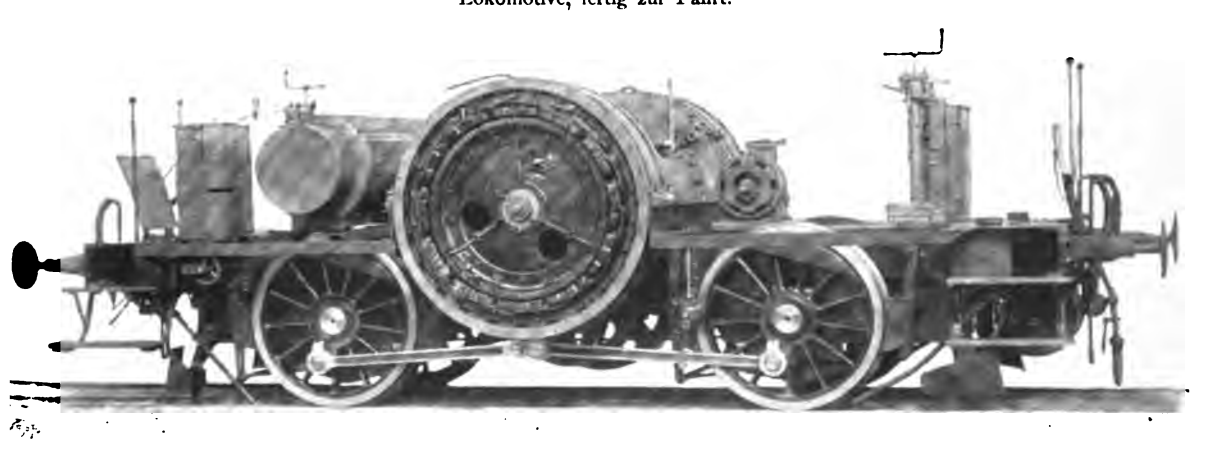
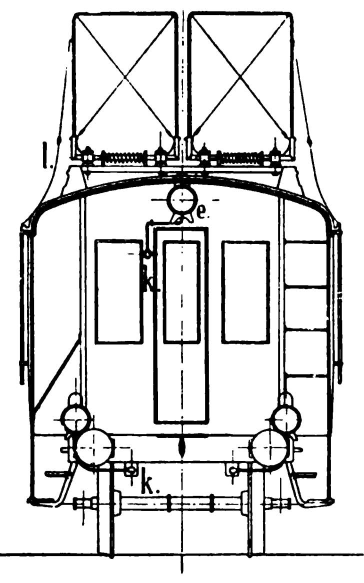


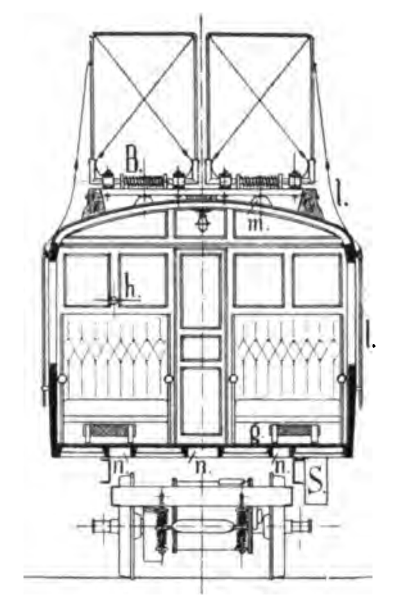
Fig. 36.
Lokomotive mit abgenommenem Führerhaus.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig. Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

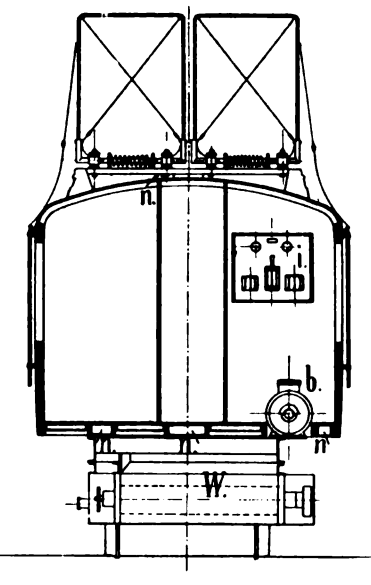
Schnitte durch einen Motorwagen (Automobil) der Burgdorf-Thun-Bahn.



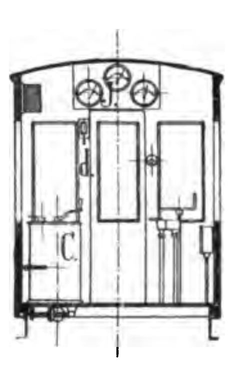
l Handhabe zum Abziehen der Bügel.
k Steckkontakt für Lampen.
e Signallampe.



B Bügelbefestigung. *g* Heizkörper.
n Leitungskanal. *h* Heizschalter.
S Sicherungen.



n Leitungen. *b* Signallampe.
W Anlasswiderstand. *i* Schaltbrett für den Kompressormotor.

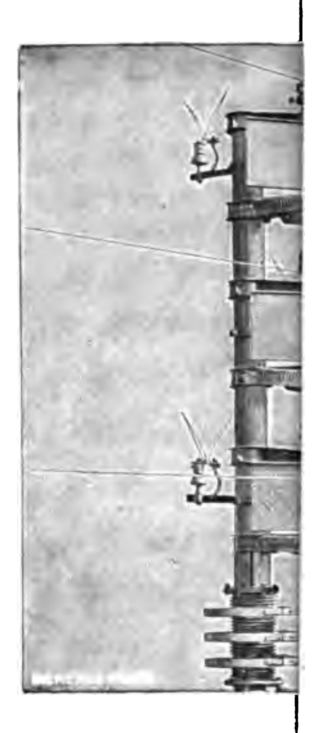


Führerstand.
C Fahrschalter (Kontroller).
J Strom- und Spannungszeiger.
d Schalter zum Kompressomotor.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig. Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.



Zossen. (10000 Volt.)



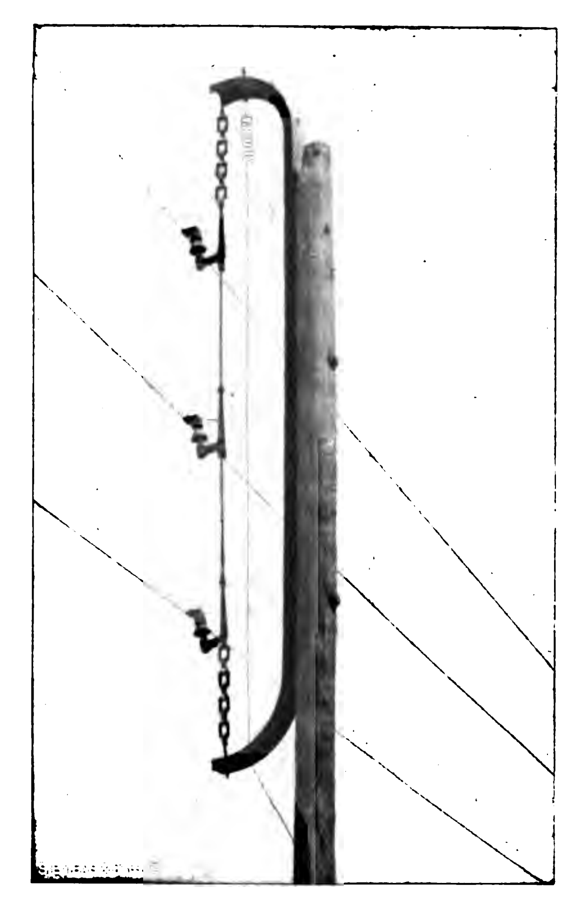


Fig. 41.
Mast und Isolator.



Höhe des untersten Drahtes über Schienenoberkante: 5,5 m.
Drahtquerschnitt: 100 qmm.
Bruchfestigkeit: 3800 kg.

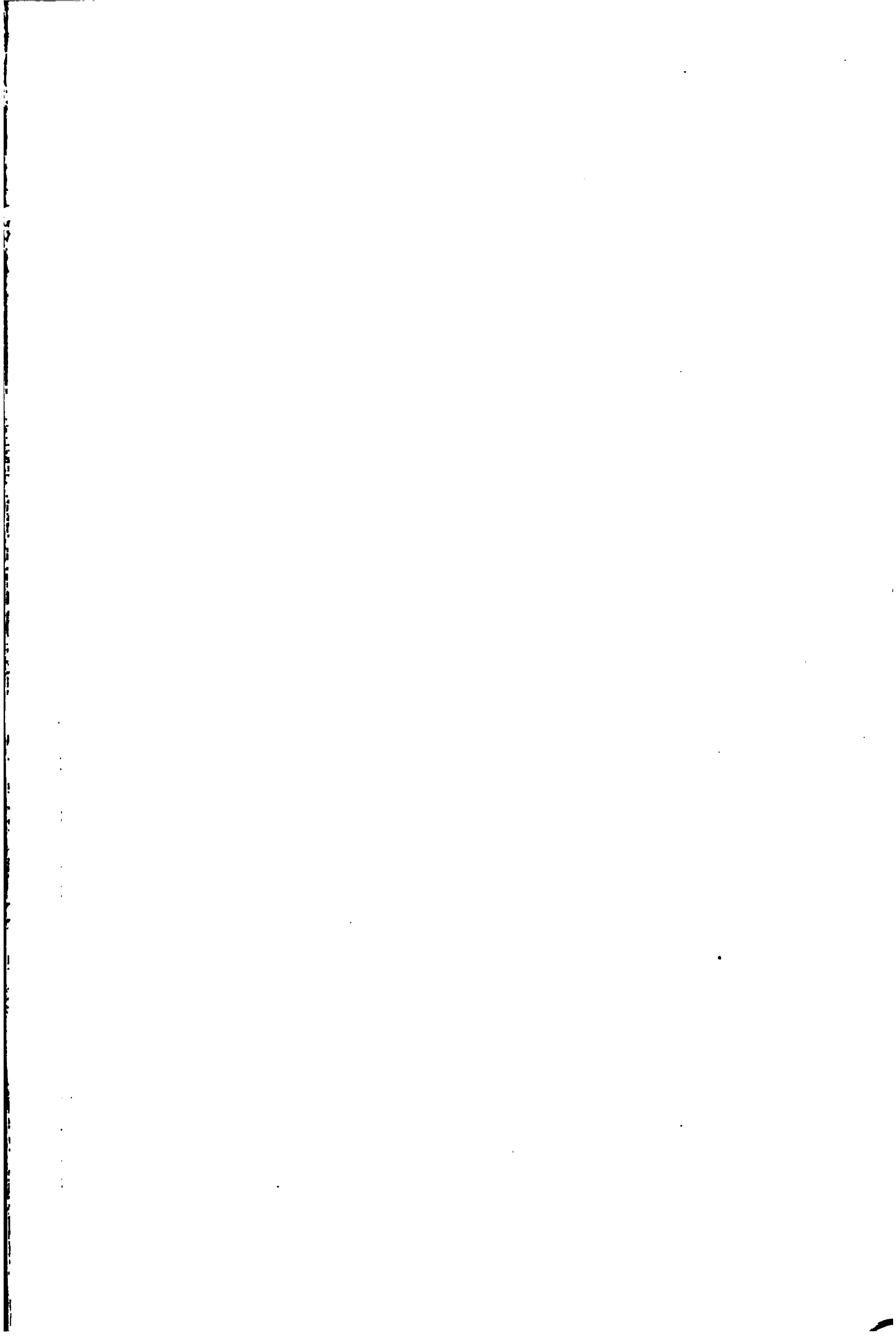
…en befestigt, die auf hartgummiumpresste Bolzen geschraubt sind.
…eilen, die vertikal zwischen »Schnallenisolatoren« (hartgummi-
…espannt sind.
…tzring, der bei Drahtbruch Erdschluss herstellt.
…gegen einen in 6 m Höhe angreifenden Horizontalzug von

… auf die Stromabnehmer dienen besondere Entlastungsflächen.

Abspannvo…

Verlag von Arthur Feli… Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.





Streckenausrüstung der Burgdorf-Thun-Bahn.

(von Brown Bovéri & Co. erbaut.)

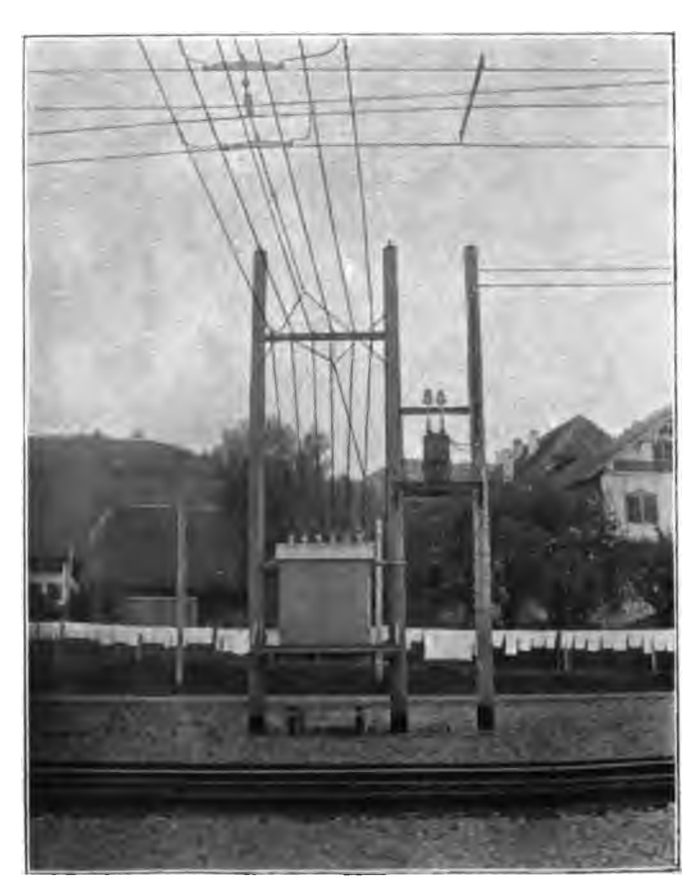


Fig. 44.

Hörnerblitzableiter.

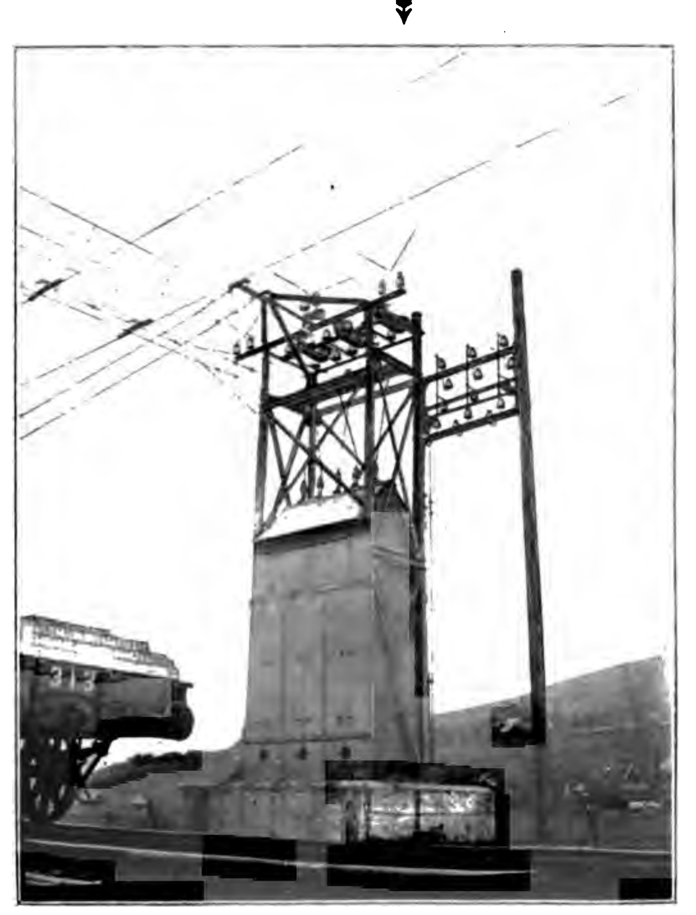


Fig. 45.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig.

Speisepunktausschalter an einer Transformatorenstation.

Transformatorenstation.

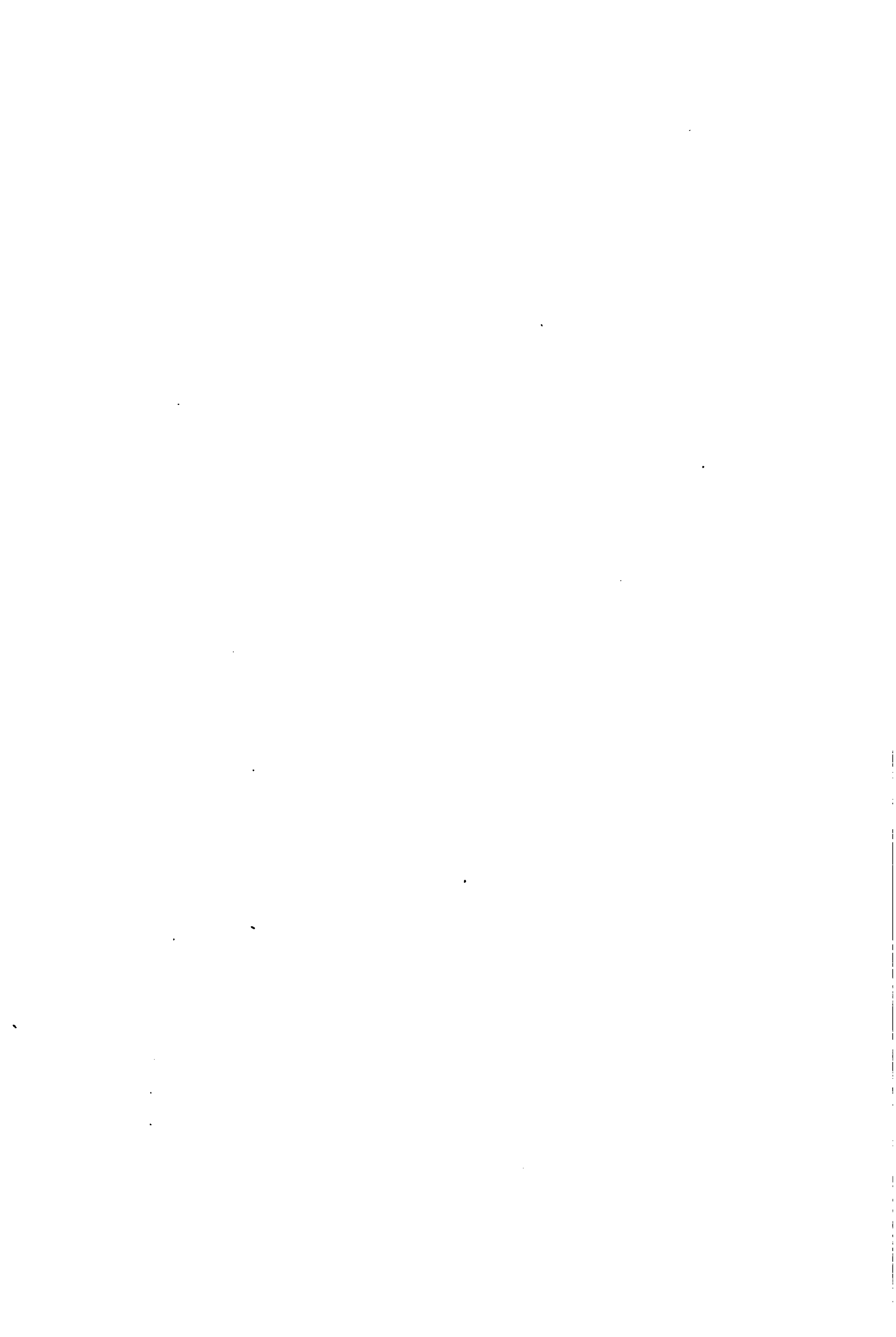


Fig. 46.
Speisepunktausschalter an einer Transformatorenstation,
innere Einrichtung.



Fig. 47.
Kleine Streckenausschalter.

Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.



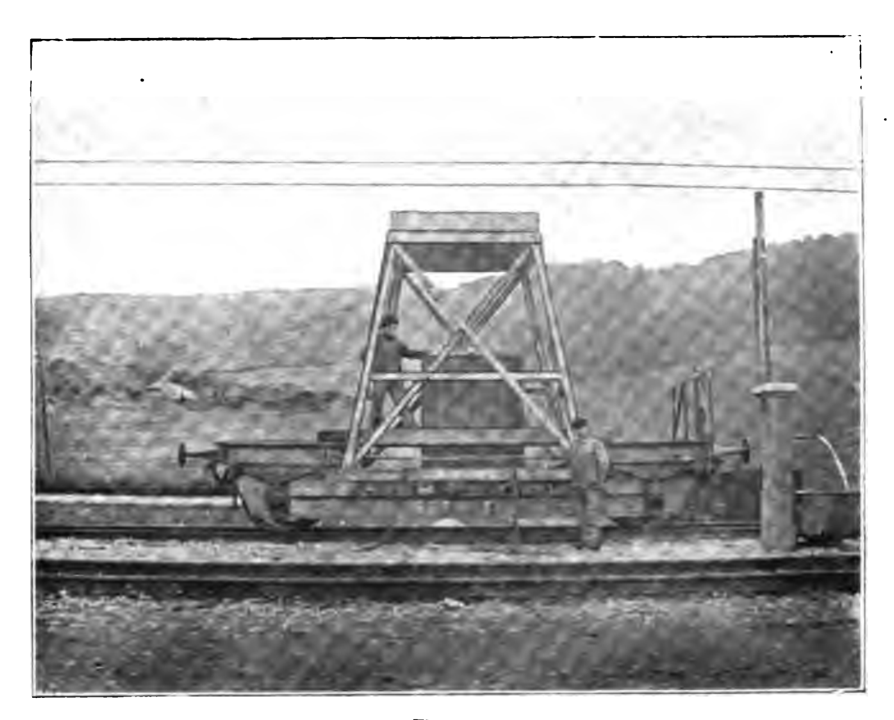


Fig. 50.
Montagewagen, eingerichtet für Auswechslung der Transformatoren und Bedienung der Oberleitung.



Fig. 51.
Transformator für Stationsbeleuchtung.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig. Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.



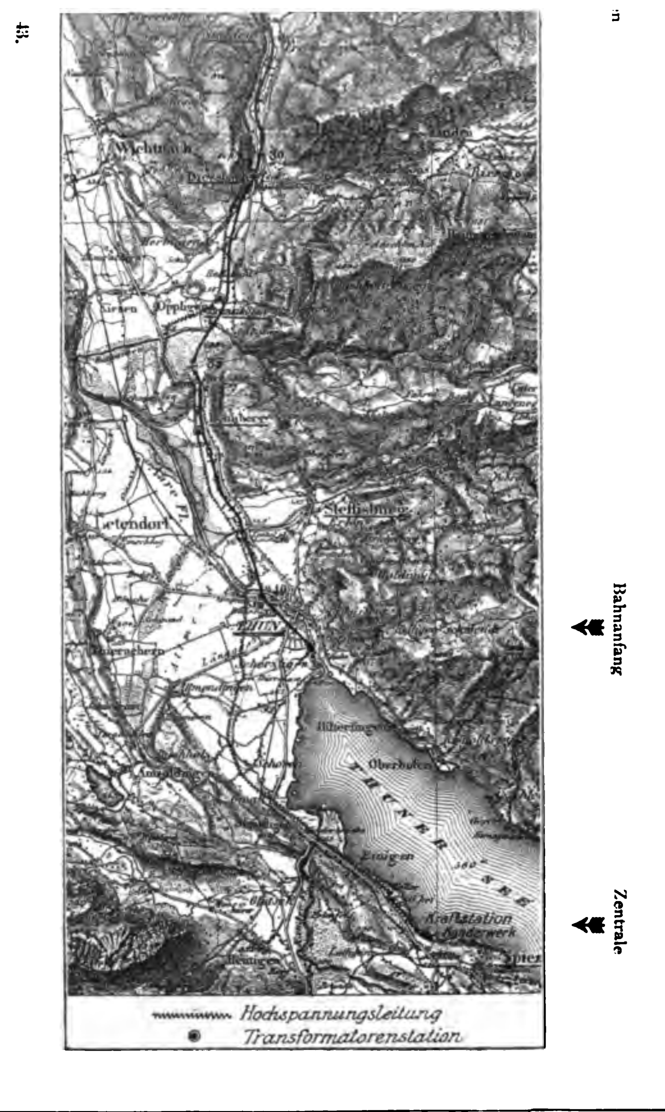






Fi

Verlag von Arthur Felix in Leipzig.



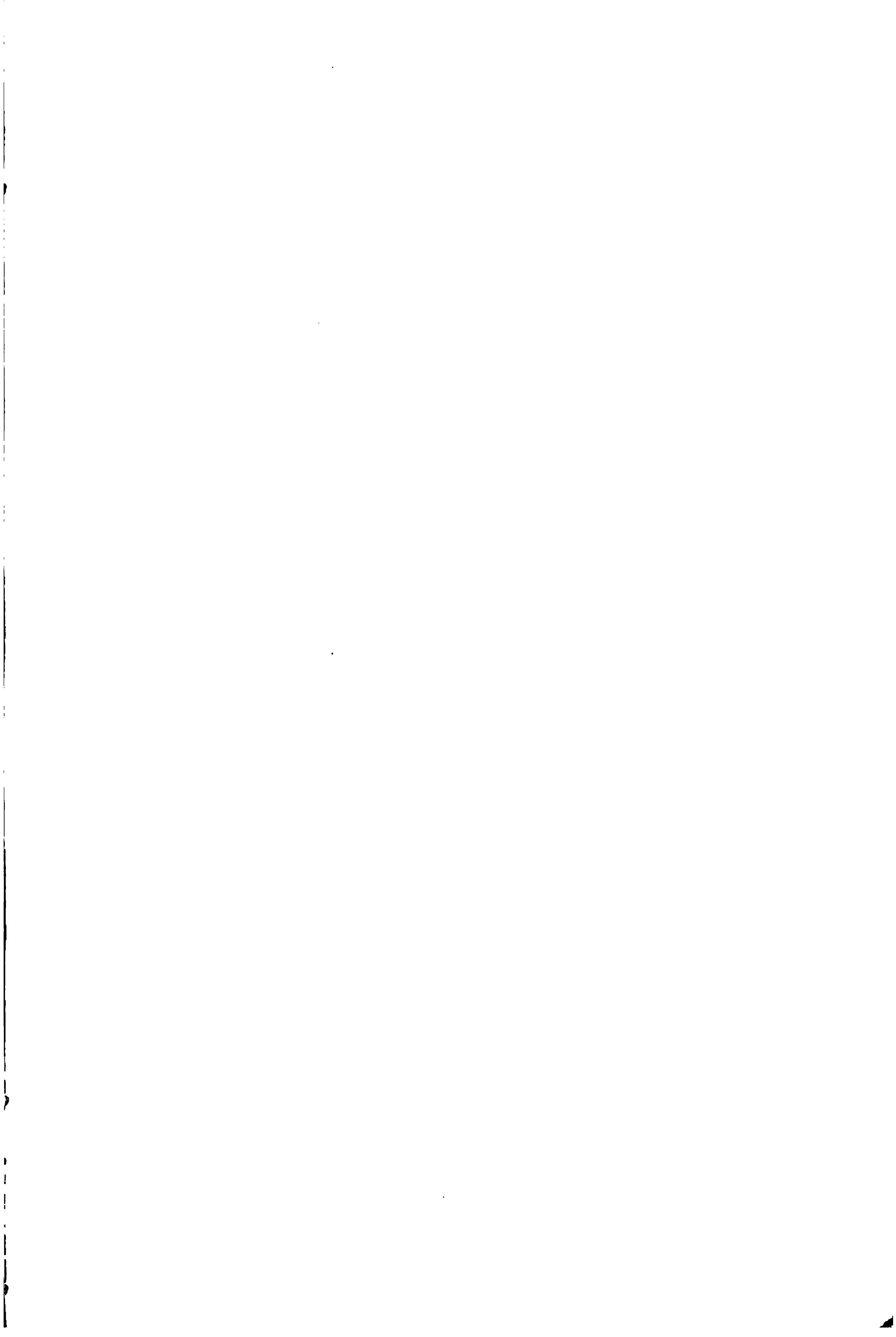
43.



Fig. 52.
Bedienung der Stromabnehmer bei der Burgdorf-Thun-Bahn.

Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.





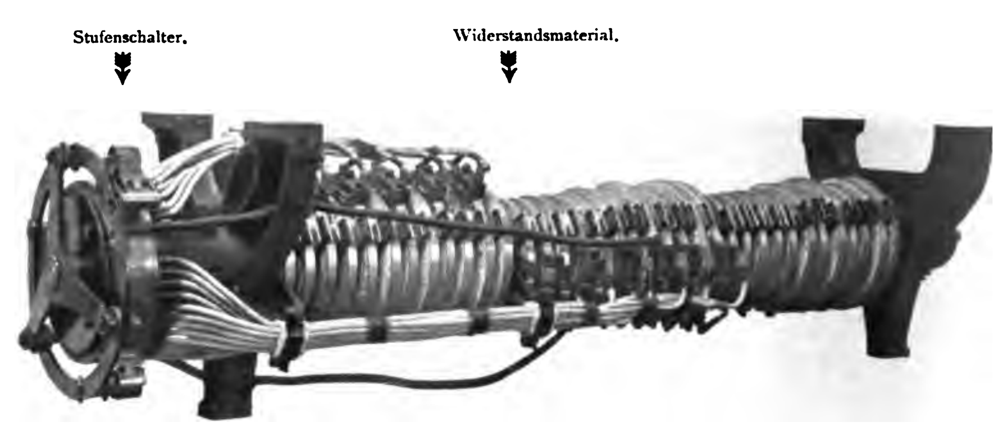


Fig. 54.
Konstruktion des Anlass- und Regulierwiderstandes.



Fig. 56.
Anordnung der Wagensicherungen.



Fig. 56.
Anbringung der Regulierwiderstände.



Fig. 57.
Fahrschalter.

Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

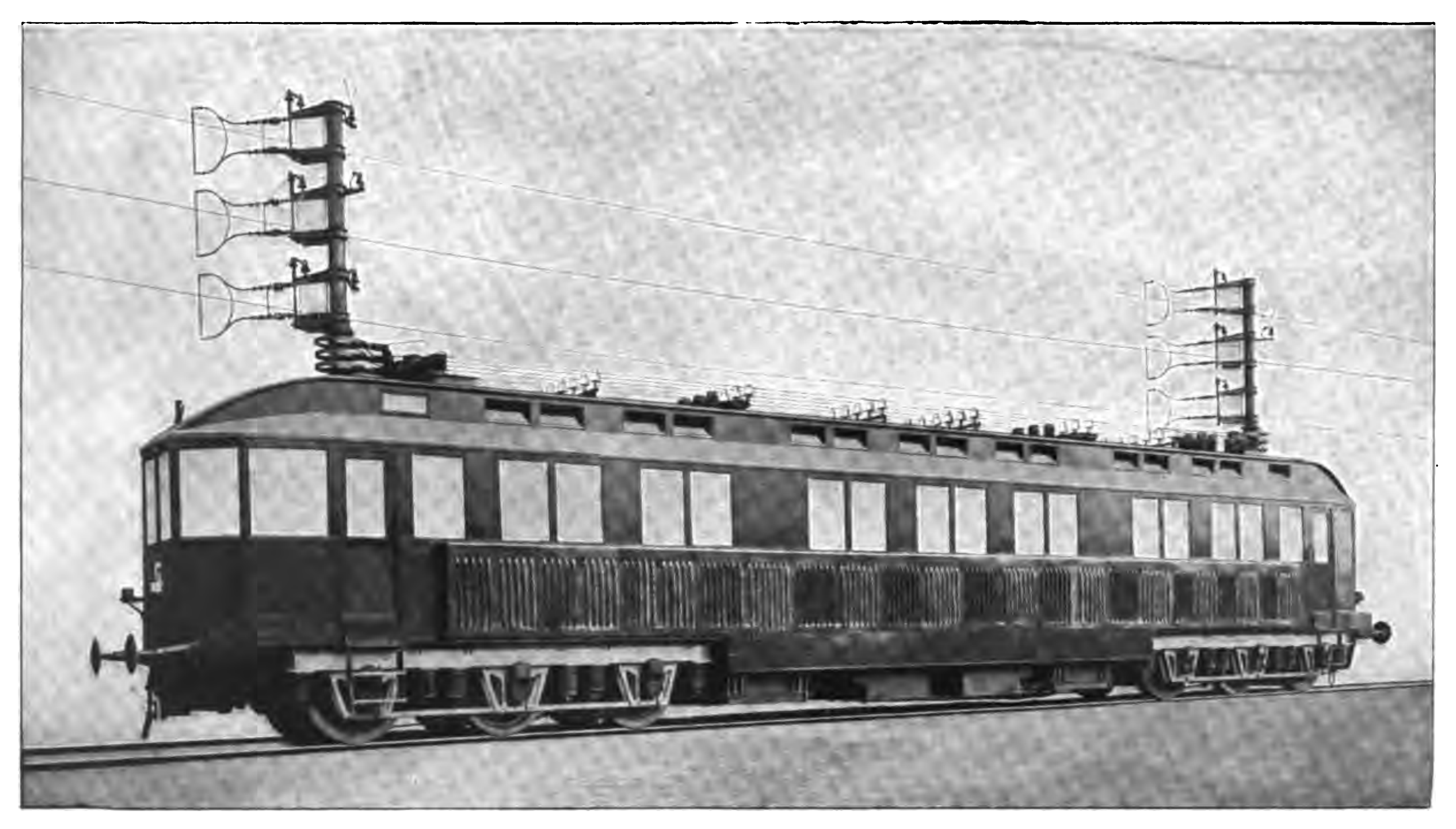


Fig. 58.
Motorwagen der Studiengesellschaft für elektrische Fernschnellbahnen. Erbaut von Siemens & Halske.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig. Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

Schnellbahnwagen von Siemens & Halske.



Fig. 59.
Drehgestell mit eingebauten Motoren.



Fig. 61.
Führerstand.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig. Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

Schnellbahnwagen von Siemens & Halske.

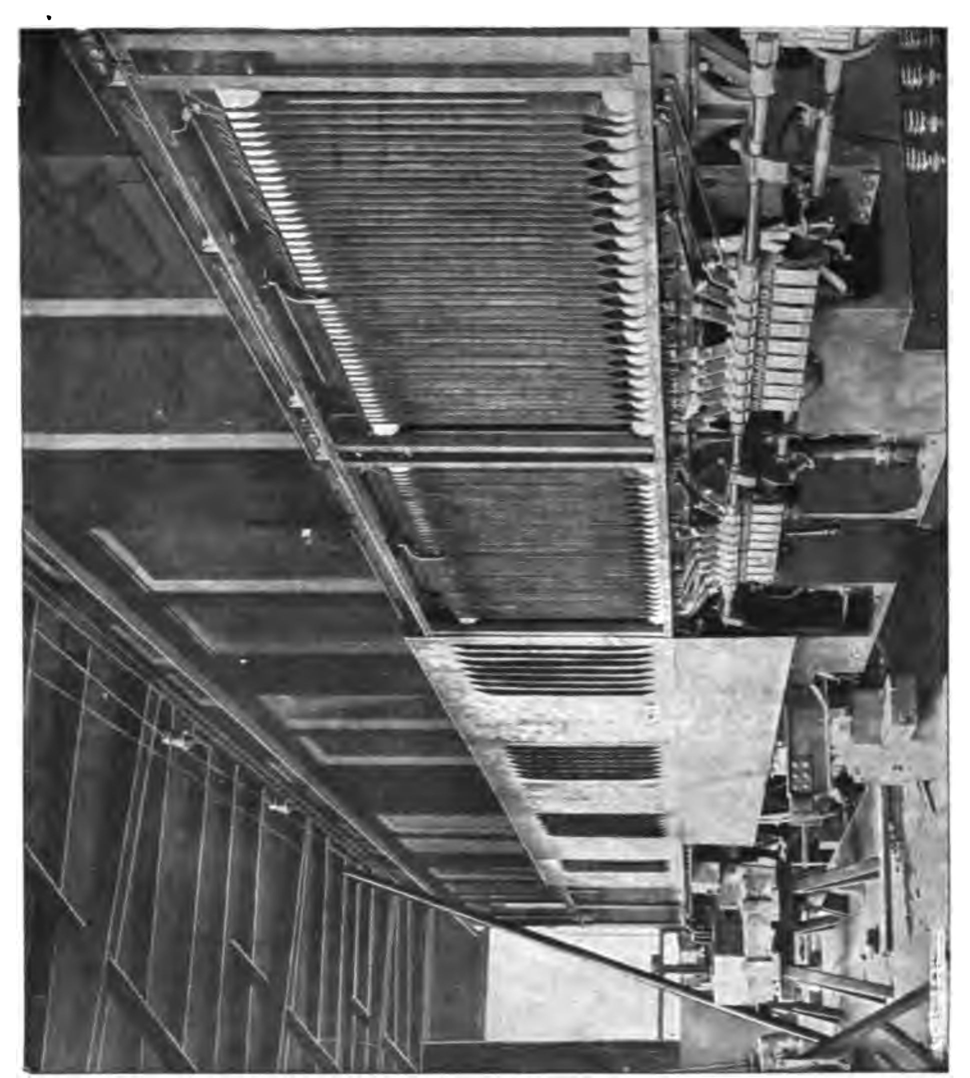


Fig. 60.
Anordnung des Anlasswiderstandes und der Stufenschalter dazu.

Verlag von Arthur Felix in Leipzig. Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.

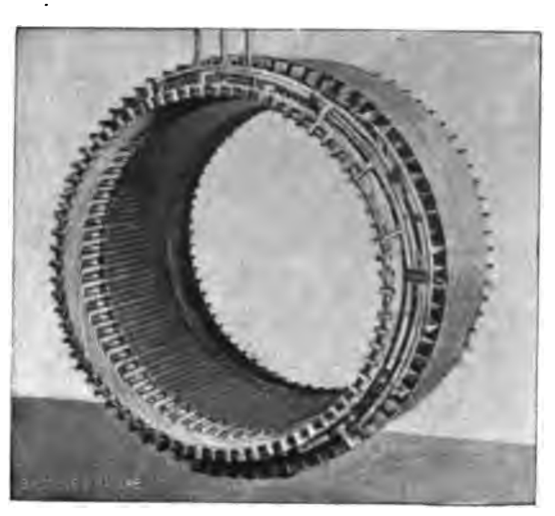


Fig. 62.
Lauf des Schnellbahnmotors.

Fig.
Schnitt durchs Gehäuse

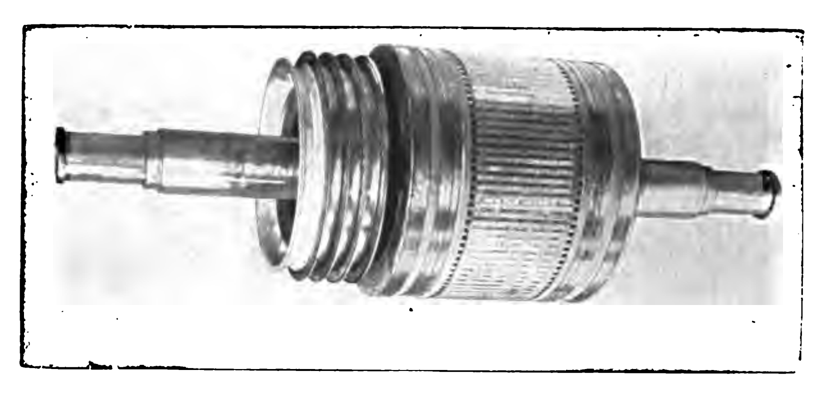
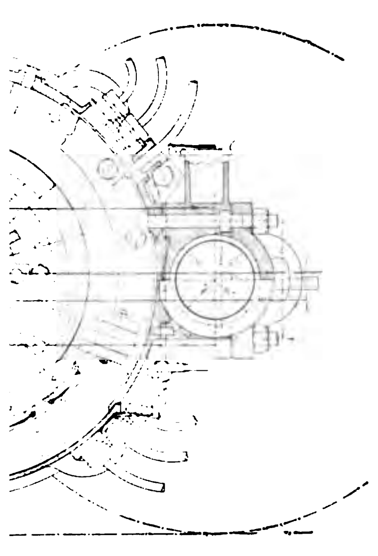


Fig. 62a.
Läufer des Schnellbahnmotors für 1150/1850 Volt.



3a.
les 10000 Volt-Motors.



Fig. 64.
Lauf mit Hochspannungswicklung für 10000 Volt.

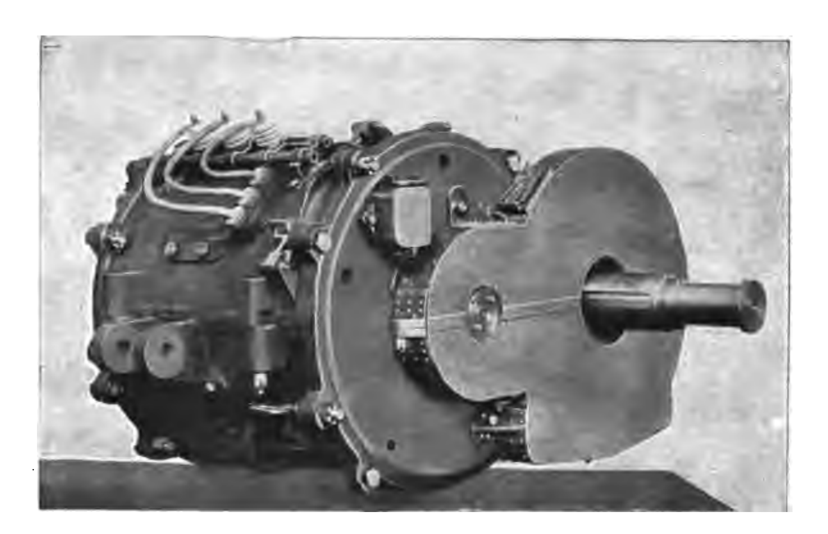
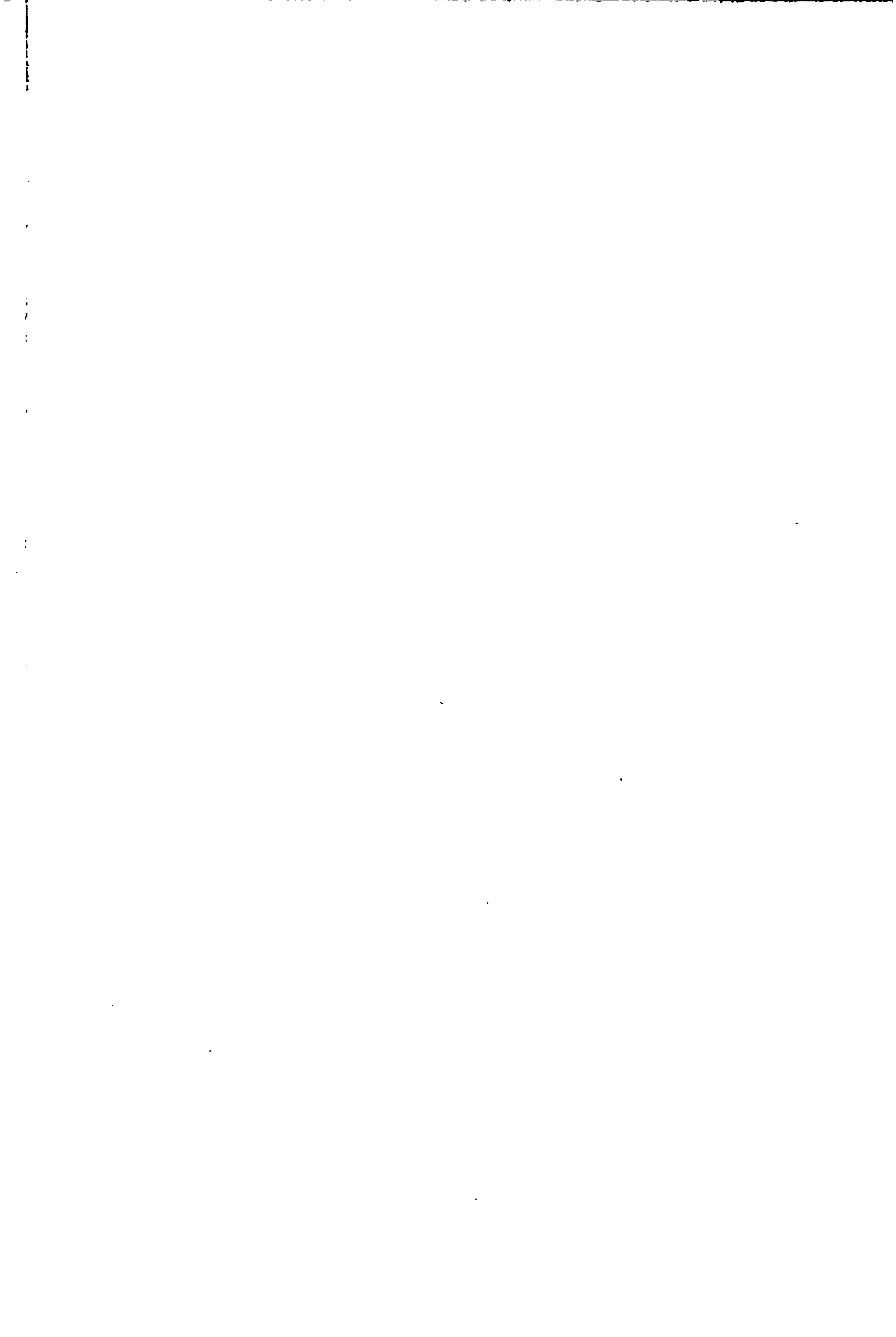


Fig. 63.
Vollbahnmotor für 10000 Volt.

Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.





Schaulinien des Schnellbahn-Motors $cDM^{39}/_{32}$ für 1150 Volt

Leistung P.S.
Umdrehungen $\frac{1}{min}$ n
Amp Primärstrom J_1

1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0

n
J_1
P.S.
J_2
η
$\cos\varphi$

0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 mkg

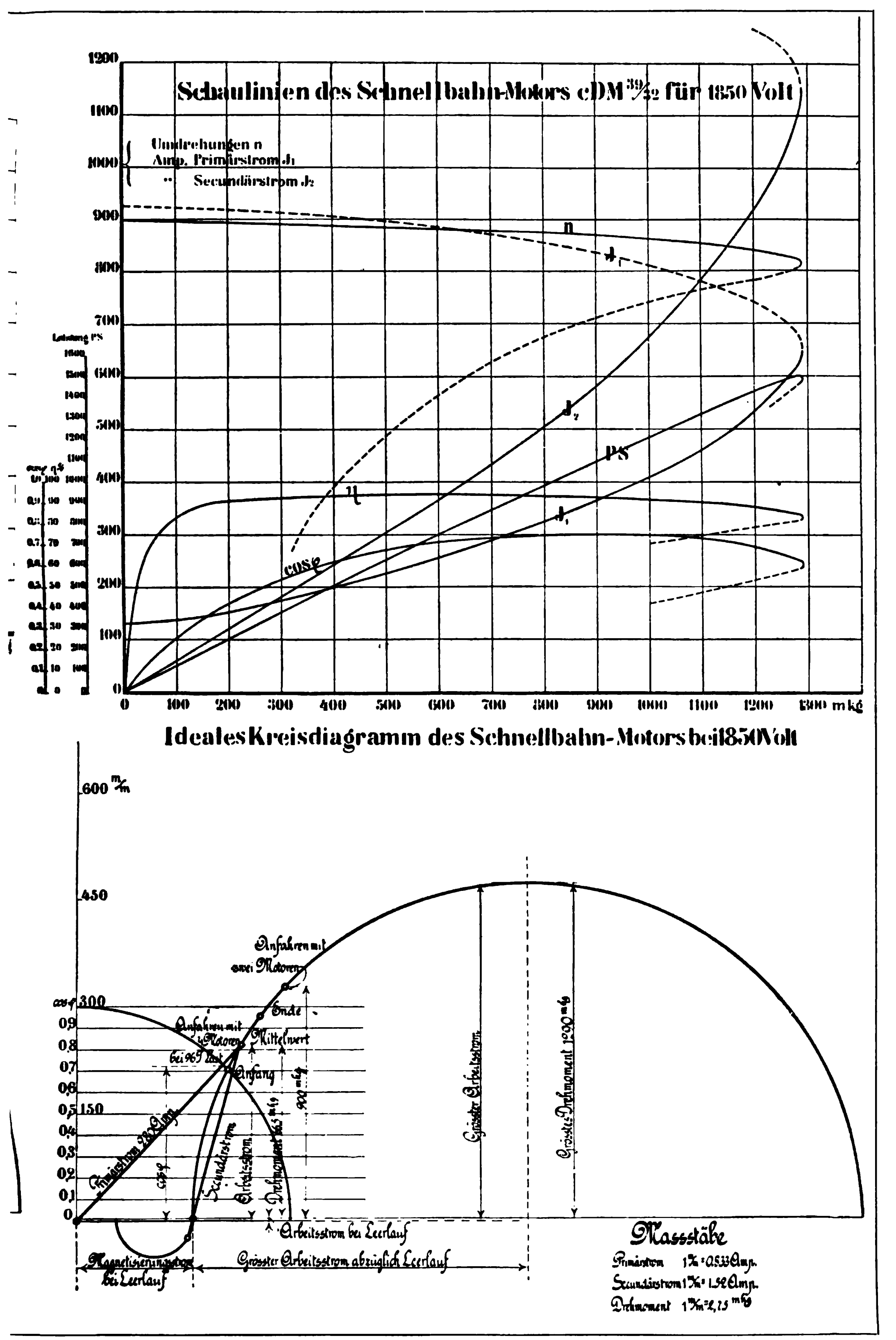
600 m/m
500
400
200
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0

Anfahren mit 4 Motoren
Fahrt mit 2 Motoren allein
Fahrt mit 4 Motoren
Primärstrom
Secundärstrom
Arbeitsstrom
Drehmoment
cos φ
Grösster Arbeitsstrom
Grösstes Drehmoment
Arbeitsstrom für Leerlauf
Grösster Arbeitsstrom abzüglich Leerlauf
Magnetisierungsstrom bei Leerlauf

Massstäbe

Primärstrom 1 m/m = 0,625 Amp.
Secundärstrom 1 m/m = 1,18 Amp.
Drehmoment 1 m/m = 1,3 mkg

Verlag von Arthur Felix in Leipzig.



Druck von A. Th. Engelhardt in Leipzig.



